

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Návrh odpojovače na vysoké napětí  
Draft MV disconnectors

2014

Bc. Eduard Bartík

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Eduard Bartík**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Návrh odpojovače vn  
Draft MV disconnectors**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor použití a provedení odpojovačů vn pro vnitřní provedení.
2. Zvolte konstrukční uspořádání odpojovače na zadané parametry:  $U_n=6$  kV,  $I_n=1250$  A,  $I_d=25$  kA,  $I_{th}=20$  kA.
3. Navrhněte proudovodnou dráhu, včetně kontaktů.
4. Ověřte návrh na dynamické účinky zkatového proudu a oteplení v ustáleném stavu.
5. Rámcově navrhněte parametry mechanismu.
6. Realizujte výkres sestavy odpojovače v 3f. provedení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Bílině dne: 23. 4. 2014



---

Eduard Bartík

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc. za odborné rady a připomínky, a za čas, který mi věnoval při zpracování diplomové práce. Za podporu a zároveň pochopení pro nedostatek volného času nejen při psaní této diplomové práce, ale také po celý čas studia děkuji také své rodině, zvláště pak své manželce Michaelce.

## **ABSTRAKT**

Náplní této diplomové práce je návrh odpojovače na vysoké napětí. V úvodu uvedu obecné vlastnosti a použití odpojovačů. Dále uvedu teoretický rozbor navrhovaných částí odpojovače. V samotném návrhu provedu návrh izolace, a proudovodné dráhy odpojovače. Provedu výpočet elektrodynamických sil a také výpočet ustáleného oteplení metodou jednořadového tepelného pole. U navrženého odpojovače pak provedu výpočet na krátkodobé oteplení nejmenšího průřezu odpojovače. Dále provedu návrh přítlačné pružiny na kontakty. Odolnost kontaktů při průchodu zadaného zkratového proudu pak ověřím výpočtem úbytků napětí na těchto kontaktech. Součástí diplomové práce je doporučit moment na hřídeli. Výpočet momentu provedu na závěr práce na zjednodušeném modelu tíhy mechanických dílů, určené k přechodu odpojovače z jednoho stavu do druhého.

### **Klíčová slova:**

Odpojovač, izolační vzdálenost, elektrodynamický síly, zkratový proud, oteplení, průřez, stykový odpor, přítlačná pružina, tření, moment.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is the design of high voltage disconnectors. In the introduction I will give general characteristics and use of defeat. Next, bring the theoretical analysis of the proposed components of the disconnector. In the proposal itself through the design of insulation, and Busbars isolators. Perform the calculation of electrodynamic forces and calculation of steady warming by jednořadového thermal field. In the proposed isolator then perform a calculation on a short-term warming smallest cross-section disconnector. Furthermore, through the design of the pressure spring for contacts. Contact resistance during the passage of a specified short-circuit current calculation then I check my voltage drops on these contacts. The thesis is recommended torque on the shaft. Mass moment of conclusion of the work performed on the simplified model, the weight of the mechanical parts, designed to switch disconnectors from one state to another.

### **Keywords:**

Disconnector, isolation distance, electrodynamic forces, short-circuit current, temperature rise, cross-section, contact resistance, compression spring, friction, moment.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
1.1	ODPOJOVAČ .....	8
1.2	POUŽITÍ ODPOJOVAČE .....	8
1.3	ROZDĚLENÍ ODPOJOVAČŮ .....	8
<b>2</b>	<b>PODMÍNKY NÁVRHU ODPOJOVAČE VN .....</b>	<b>10</b>
2.1	PRACOVNÍ PODMÍNKY .....	10
2.1.1	Normální pracovní podmínky .....	10
2.1.2	Zvláštní pracovní podmínky .....	10
2.2	JMENOVITÉ CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ODPOJOVAČE .....	10
<b>3</b>	<b>ZÁKLADNÍ ČÁSTI NÁVRHU ODPOJOVAČE .....</b>	<b>11</b>
3.1	IZOLACE .....	11
3.1.1	Izolační vzdálenosti .....	11
3.1.2	Izolační médium.....	12
3.2	PROUDOVODNÁ DRÁHA .....	12
3.3	POHON MOTORU .....	13
<b>4</b>	<b>NÁVRH ODPOJOVAČE VN .....</b>	<b>14</b>
4.1	NÁVRH IZOLACE ODPOJOVAČE.....	14
4.1.1	Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi póly odpojovače krátkodobou zkouškou výdržným střídavým napětím .....	14
4.1.2	Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi póly odpojovače zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu .....	15
4.1.3	Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi živými částmi odpojovače a zemí zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu .....	16
4.1.4	Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti v rozpojené kontaktní dráze odpojovače výdržným napětím při atmosférickém impulsu .....	16
4.1.5	Určení minimální nepřeskokové povrchové dráhy a nastavení vzdálenosti koordinačních hrotů .....	17
4.2	NÁVRH PROUDOVÉ DRÁHY ODPOJOVAČE, ROZMĚRY A PŮSOBÍCÍ SÍLY .....	18
4.2.1	Velikost krátkodobého výdržného proudu a efektivní velikost dynamického výdržného proudu.....	18
4.2.2	Určení průřezu připojovacího pásu odpojovače .....	18
4.2.3	Určení průřezu pohyblivého kontaktu .....	19
4.2.4	Určení průřezu roubíku .....	19
4.2.5	Určení minimální přitlačné síly na kontaktní styk .....	19
	4.2.5.1 <i>Kluzný kontaktní styk přímkový</i> .....	19
	4.2.5.2 <i>Kontaktní styk pevný plošný</i> .....	21
4.2.6	Elektrodynamické síly .....	21
	4.2.6.1 <i>Odpudivé síly v proudové úžině</i> .....	21
	4.2.6.2 <i>Přitažlivé síly mezi paralelními noži</i> .....	22
	4.2.6.3 <i>Přitažlivá síla mezi praporcem a rovnoběžným nožem odpojovače</i> .....	23
	4.2.6.4 <i>Výsledná elektrodynamická síla</i> .....	24
	4.2.6.5 <i>Potřebná velikost přitlačné síly vyvolaná pomocí přitlačné pružiny</i> .....	24
	4.2.6.6 <i>Síla záhybu proudové dráhy působící na rovnoběžné nože</i> .....	25

4.3	OTEPLENÍ PROUDOVÉ DRÁHY .....	26
4.3.1	Měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení .....	26
4.3.2	Horní přípojovací pás .....	26
4.3.2.1	Určení činitele zvýšení elektrického odporu snížení průřezu praporce.....	26
4.3.2.2	Činitel skinefektu .....	27
4.3.2.3	Elektrický odpor horního přípojovacího pasu.....	27
4.3.2.4	Náhradní chladiivost povrchu horního pasu.....	27
4.3.2.5	Velikost chladicí plochy horního pasu.....	28
4.3.2.6	Výpočtová velikost chladicího obvodu horního pasu .....	28
4.3.2.7	Veličiny náhradního $\pi$ – článku horního pasu .....	28
4.3.2.8	Náhradní $\pi$ -článek horního pasu .....	29
4.3.2.9	Zařazení kloubu do schématu horního praporce jako chladicí tyče .....	29
4.3.2.10	Kompletní tepelné schéma horního praporce.....	31
4.3.3	Dolní přípojovací pás.....	31
4.3.3.1	Veličiny náhradního $\pi$ – článku dolního praporce .....	32
4.3.3.2	Náhradní tepelné schéma dolního praporce .....	32
4.3.4	Pevný kontakt .....	32
4.3.4.1	Průřez roubíku .....	32
4.3.4.2	Činitel skinu roubíku .....	33
4.3.4.3	Elektrický odpor roubíku .....	33
4.3.4.4	Uvážení povrchového jevu .....	33
4.3.4.5	Chladivý povrch roubíku .....	33
4.3.4.6	Náhradní chladiivost roubíku .....	33
4.3.4.7	Náhradní schéma roubíku .....	34
4.3.5	Odpojovací nůž.....	35
4.3.5.1	Určení činitele zvýšení elektrického odporu odpojovacího nože.....	35
4.3.5.2	Činitel skinefektu .....	35
4.3.5.3	Elektrický odpor odpojovacího nože .....	35
4.3.5.4	Náhradní chladiivost povrchu odpojovacího nože.....	36
4.3.5.5	Výpočtová velikost chladicího obvodu nože.....	37
4.3.5.6	Veličiny náhradního $\pi$ – článku pro dva paralelně nože .....	37
4.3.5.7	Náhradní $\pi$ -článek odpojovacího nože .....	37
4.3.5.8	Zařazení konce nožů do schématu jako chladících tyčí.....	37
4.3.5.9	Náhradní $\pi$ -článek s konci nože .....	39
4.3.5.10	Zařazení ocelových příložek do schématu odpojovacího nože.....	39
4.3.5.11	Náhradní $\pi$ -článek ocelový příložky s rozdělením odporu .....	42
4.3.5.12	Schéma odpojovacího nože s ocelovými příložkami.....	42
4.3.6	Pracovní kontakt –pružinový styk .....	43
4.3.6.1	Elektrický odpor jednoho dotykového místa .....	43
4.3.6.2	Tepelný odpor dotykového místa .....	43
4.3.6.3	Tepelný odpor dvou styků paralelně .....	43
4.3.6.4	Tepelné ztráty v jednom styku.....	43
4.3.6.5	Náhradní schéma činného styku .....	43
4.3.7	Praporcový šroubový spoj – přívod, vývod.....	43
4.3.7.1	Skutečná přitlačná síla .....	44
4.3.7.2	Elektrický odpor šroubového spoje.....	44
4.3.7.3	Tepelný odpor šroubového spoje .....	44
4.3.7.4	Ztráty šroubového spoje.....	44
4.3.7.5	Náhradní schéma šroubového spoje.....	44
4.3.8	Šroubový spoj pevného kontaktu s praporcem.....	44

4.3.8.1	<i>Skutečná přítlačná síla</i>	45
4.3.8.2	<i>Elektrický odpor šroubového spoje</i>	45
4.3.8.3	<i>Tepelný odpor šroubového spoje</i>	45
4.3.8.4	<i>Ztráty šroubového spoje</i>	45
4.3.8.5	<i>Náhradní schéma šroubového spoje roubík-praporec</i>	45
4.3.9	Horní přípojnice	45
4.3.9.1	<i>Veličiny náhradního schématu horní přípojnice</i>	46
4.3.9.2	<i>Náhradní schéma horní přípojnice</i>	46
4.3.10	Dolní přípojnice	47
4.3.10.1	<i>Veličiny náhradního schématu dolní přípojnice</i>	47
4.3.10.2	<i>Náhradní schéma dolní přípojnice</i>	47
4.3.11	Kompletní tepelné schéma odpojovače	47
4.4	KRÁTKODOBÉ OTEPLENÍ	48
4.4.1	Krátkodobé oteplení proudovodné dráhy v části nejmenšího průřezu	48
4.4.2	Zkratová charakteristika odpojovače	49
4.4.3	Krátkodobé oteplení na kontaktech	49
4.5	NÁVRH KONTAKTNÍ PRUŽINY	50
4.6	NÁVRH MOMENTU PRO POHON	51
4.6.1	Hmotnost jednotlivých dílů	52
4.6.1.1	<i>Tíha dvou měděných nožů jednoho pólu odpojovače</i>	52
4.6.1.2	<i>Tíha dvou ocelových příložek</i>	52
4.6.1.3	<i>Tíha hlavice táhla</i>	52
4.6.1.4	<i>Tíha porcelánového táhla</i>	52
4.6.1.5	<i>Tíha šroubů táhla</i>	52
4.6.1.6	<i>Tíha páky na hřídeli</i>	53
4.6.2	Statické momenty	53
4.6.2.1	<i>Moment tíhy nožů</i>	53
4.6.2.2	<i>Moment tíhy ocelových příložek</i>	53
4.6.2.3	<i>Moment celku - táhlo, šrouby, obě hlavice a páka</i>	53
4.6.2.4	<i>Celkový moment působící na vysunutí nožů z pevného kontaktu</i>	53
4.6.3	Určení momentu odporu třením a síly přemáhající tření	53
4.6.4	Ovládací moment trojpólové jednotky	54
<b>ZÁVĚR</b>		<b>57</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>		<b>59</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>		<b>60</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>		<b>61</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>		<b>63</b>



## 1 ÚVOD

Početnou a také důležitou skupinou elektrických přístrojů používaných ve vnitřních nebo venkovních elektrických rozvodech nízkého napětí, vysokého napětí nebo velmi vysokého napětí je skupina přístrojů, kterou obecně nazýváme přístroje bez oblouku. Hlavními zástupci těchto přístrojů bez oblouku jsou právě odpojovače.[3]

### 1.1 Odpojovač

Odpojovač je spínací přístroj, který slouží k rozpojení nebo k sepnutí nezatíženě části elektrického vedení, distribuční sítě nebo jiného elektrického obvodu. Má dva provozní stavy (zapnuto, vypnuto). K přechodu z jednoho stavu do druhého smí dojít jen konáním obsluhy a je prováděn mechanicky, nebo pomocí pohonu. Oba stavy musí být dobře viditelné, nebo v případě dnešních moderních zapouzďřených odpojovačů musí být daný provozní stav spolehlivě signalizován.

Odpojovač musí trvale přenášet daný jmenovitý proud, kde musí odolat oteplení, způsobené velikostí tohoto proudu. Odpojovač neumí vypínat zkrat, ale je u něho zaručena mechanická odolnost, aby se nepoškodil průchodem zkratového proudu. Při průchodu zkratového proudu musí odolat nejen elektrodynamickým silám, ale zároveň velikosti oteplení, které způsobí zkratový proud a to do doby, než zkratový proud vypne nadřazený vypínač. Provedení odpojovače musí odpovídat normě [2]

### 1.2 Použití odpojovače

Odpojovač slouží především k vytvoření bezpečné izolační vzdálenosti mezi úsekem pod napětím a částí, která je odpojená. Odpojovač v provozním stavu vypnuto tak zajišťuje ochranu pracovníků, pracujících za účelem např. revize, nebo opravy na elektrickém zařízení na dané, odpojovačem odpojené části elektrického obvodu. Izolace mezi živými a neživými částmi musí být tak velká, aby vydržela napěťové zkoušky, které udává norma [2] pro příslušné napěťové hladiny. V případě přepětí musí být zajištěn přeskok k zemi, to znamená, že nesmí dojít k přeskoku v dané odpojované dráze. Izolační hladina odpojovačů obvykle bývá o 15% vyšší než u ostatních přístrojů[3].

Z názvu skupiny přístroje bez oblouku vyplývá, že odpojovač nemá zařízení k zhášení elektrického oblouku. Proto manipulace s ním se provádí pouze v bezproudém stavu, to znamená po vypnutí příslušného vypínače. V rozvodech vysokého napětí, velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí se pro zajištění pracoviště příslušné odpojované části vyžaduje vypnutí proudu nejen vypínačem, ale následně také odpojovačem v častém případě doplněném o uzemňovač. Také ovládání odpojovače s ovládacími prvky používané k vypnutí, nebo k zapnutí odpojovače, je zajištěno blokováním, a to tak, aby v případě chybné manipulace nedošlo k ohrožení zdraví obsluhy, nebo k poškození odpojovače.

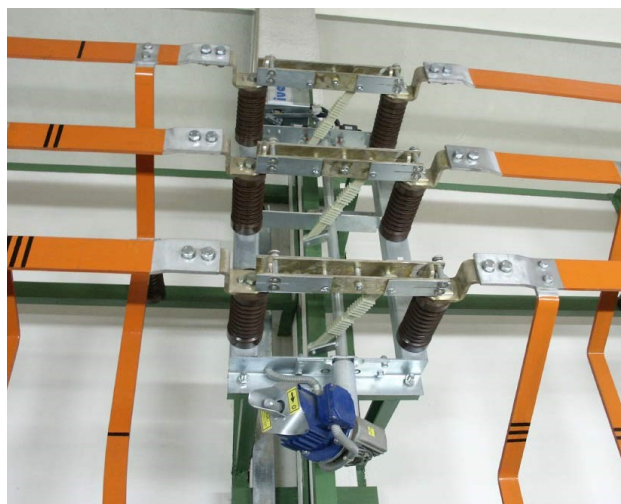
### 1.3 Rozdělení odpojovačů

Hledisek pro rozdělení odpojovačů je mnoho. Dělení může být například podle provedení, použití, počtu pólů, nebo také podle druhu, nebo pohybu jejich pohyblivého kontaktu. Často také bývá provedení odpojovačů v kombinaci se zemnicími noži. Pohyb těchto zemnicích nožů je pak vázán s činností pohyblivých kontaktů.

Nejčastější příklady rozdělení odpojovačů:

- **Podle provedení:**
  - Venkovní
  - Vnitřní
- **Podle použití:**

- Přípojnicové
- Vývodové
- **Podle počtu pólů:**
  - Jednopolové
  - Dvoupólové
  - Trojpólové
  - Vícepólové
- **Podle pohonu přechodu z jednoho stavu do druhého:**
  - Ruční
  - Pneumatický
  - Elektromotorický
- **Podle pohybu a druhu pohyblivého kontaktu:**
  - Nožové
  - Posuvné
  - Sklápěcí
  - S otočným ramenem
  - Pantografové
- **Podle možnosti uzemnění hlavních obvodů:**
  - Bez zemnicího nože
  - S jedním zemnicím nožem
  - S dvěma zemnicími noži



**Obr. 1.3-1** Provedení vnitřního odpojovače

## 2 PODMÍNKY NÁVRHU ODPOJOVAČE VN

### 2.1 Pracovní podmínky

Pod pojmem pracovní podmínky rozumíme pracovní prostředí, přesněji prostor, ve kterém je odpojovač umístěn. Vlastnosti takového prostoru nám pak ovlivňuje složení ovzduší, umístění dalších předmětů v tomto prostoru, anebo další jiné podmínky, které ovlivňují činnost elektrického zařízení, v mém případě odpojovače. Protože se můj návrh týká elektrického přístroje pro vnitřní použití, nebudu počítat s atmosférickými vlivy působící na konstrukci odpojovače. Také nebudu počítat s případem, kdy je odpojovač umístěn v blízkosti jiného elektrického zařízení, které vykazuje vysokou provozní teplotu, v opačném případě bych musel tuto skutečnost zahrnout při ověřování konstrukce na tepelné účinky procházejícího proudu.

Mimo to platí, že pokud není dohodnuto jinak, tak jsou spínací přístroje včetně pohonů a příslušenství, které jsou jejich nedílnou součástí, určeny pro použití při normálních podmínkách v rozsahu svých jmenovitých hodnot. Pokud se pracovní podmínky liší od normálních, není případem mého návrhu, bylo by nutné navrhnout spínací přístroje včetně pohonů a příslušenství tak, aby vyhověly zvláštním pracovním podmínkám. Normální a zvláštní pracovní podmínky definuje norma [2].

#### 2.1.1 Normální pracovní podmínky[2]

- Maximální teplota okolního vzduchu je  $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Maximální průměr teploty okolního vzduchu za 24 hod je  $+ 35\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Minimální průměr teploty okolního vzduchu za 24 hod je  $- 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Nadmořská výška maximálně 1000 m
- Průměrná hodnota relativní vlhkosti za 24 hod je  $\leq 95\text{ }\%$
- Průměrná hodnota relativní vlhkosti za 1 měsíc je  $\leq 90\text{ }\%$
- Okolní vzduch prakticky neobsahuje prach, kouř, korozní nebo zápalné plyny a páry nebo sůl

#### 2.1.2 Zvláštní pracovní podmínky[2]

Nejsou případem mého návrhu odpojovače, ale pro případ instalace elektrického přístroje v nadmořské výšce vyšší než 1000 m, bylo by nutné vzít v úvahu snížení dielektrické pevnosti vzduchu a jeho vliv na izolační hladinu. Zvýšené teploty okolí by se museli kompenzovat při dimenzování přípojníc a vodičů odboček zvětšením průřezu, nebo by se musela omezit proudová zatížitelnost snížením jmenovitého proudu.

V případě provozu elektrického přístroje v oblasti s vysokou vlhkostí vzduchu nebo s většími rychlými výkyvy teploty, vzniká nebezpečí kondenzace vodní páry. Pro můj navrhovaný přístroj, konstruovaný pro normální pracovní podmínky by se muselo provést opatření (např. montáž topných těles), aby se zabránilo takovému kondenzačnímu jevu a z něho vyplívající korozi, nebo jiným nepříznivým jevům.

### 2.2 Jmenovité charakteristické hodnoty odpojovače

Při návrhu odpojovače se vychází z jeho jmenovitých charakteristických hodnot. Jmenovité charakteristické hodnoty odpojovače udává norma[2]. Jsou to především:

Jmenovité napětí, jmenovitá izolační hladina, jmenovitý kmitočet, jmenovitý proud a oteplení, jmenovitý krátkodobý výdržný proud, jmenovitý dynamický výdržný proud, jmenovitá doba zkratu, jmenovité napětí pohonu a pomocných obvodů.

### 3 ZÁKLADNÍ ČÁSTI NÁVRHU ODPOJOVAČE

#### 3.1 Izolace [1]

Izolace je namáhána v elektrických přístrojích intenzitou elektrického pole, jejíž velikost se vyjadřuje v  $MV.m^{-1}$ , nebo  $kV.mm^{-1}$ . Podkladem pro návrh izolace je řešení elektrického pole. Charakter pole se mění v závislosti na uspořádání elektrod od homogenního pole až po silně nehomogenní pole. Míru homogenity vyjadřuje koeficient využití pole  $\eta$  jako poměr střední intenzity, která by existovala v rovnoměrném poli, k maximální intenzitě ve skutečném elektrickém poli. Jestliže je koeficient nižší než jedna, jedná se o nehomogenní, též nerovnoměrné pole. V případě že je koeficient roven jedné, jedná se o pole homogenní, nebo o rovnoměrné pole. Při návrhu elektrického přístroje se snažíme přiblížit co nejvíce k rovnoměrnému poli.

##### 3.1.1 Izolační vzdálenosti [1]

Návrh elektrického přístroje začíná hrubými rozměry izolačních vzdáleností. Při návrhu izolačních vzdáleností vycházíme z jeho charakteristických hodnot, obvykle jde o velikost jmenovitého napětí a velikost jmenovitého proudu. Velikost jmenovitého napětí určuje velikost napětěvé hladiny sítě, u které pak norma[2] ještě definuje tzv. nejvyšší dovolené napětí, při kterém může být elektrický přístroj provozován. Jednotlivé izolační vzdálenosti ovšem nenavrhujeme jen z hlediska bezporuchového stavu, kdy přístrojem prochází jen jmenovité hodnoty napětí, ale především u navržených izolačních vzdáleností nesmí dojít k přeskoku v případě poruchového stavu. Tyto poruchové stavy nám pak simulují podmínky dané napětěvými zkouškami, definované normou[2], a lišící se velikostí pro každou napětěvou hladinu sítě. Navržené vzdálenosti pak musí vyhovět jednak jednominutovému namáhání střídavým výdržným napětím  $U_d$  průmyslového kmitočtu, a jednak rázové zkoušce atmosférickým impulsem  $U_p$ . Velikosti jednotlivých zkoušek ukazuje tabulka 1.

Tab. 3.1.1 – velikosti zkušebních napětí podle ČSN EN 62271-102[2]

Nejvyšší napětí sítě[kV]	Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí $U_d$ [kV] (ef.hodnota)		Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu $U_p$ [kV](vrcholová hodnota)	
	Společná hodnota	V odpojovací dráze	Společná hodnota	V odpojovací dráze
7,2	20	23	40	46
			60	70

Obvykle neznáme přesný tvar a rozměry jednotlivých součástí elektrického přístroje. Proto pro jednotlivé rozměry vycházíme z empirických vztahů s uvažováním dostatečné rezervy využití elektrického pole a dalších zhoršujících vlivů, to znamená, že výchozí uspořádání ověřujeme zkouškami podle Tab. - 1, tím získáme návrh izolace, která optimálně odpovídá provozním podmínkám.

Jak bylo řečeno výše, při správně navržené izolační vzdálenosti, u napětěvých zkoušek nesmí dojít k průrazu, resp. přeskoku. Intenzita pole, při kterém dojde k průrazu, je označována jako elektrická pevnost izolantu  $E_o$ . Hodnota není konstantní, ale závisí na mnoha okolnostech, jako je např. teplota, objem izolantu, době přiloženého napětí, mechanické namáhání atd. Po zvolení izolantu tak můžeme pro určení velikosti průrazného napětí vyjít ze základního, tzv. Schwaigerova vztahu [1; str. 8] :

$$U_p = E_o \cdot \eta \cdot d \cdot k \quad [kV, kVmm^{-1}, mm] \quad (3.1.1-1)$$

kde  $k < 1$  je souhrnným činitelem respektující zhoršující vlivy (vliv materiálu, nečistot a jiné).

Při určení přeskokového napětí zjistíme výdržný napětí, kterým můžeme izolant namáhat v normálním provozu, nebo při provádění napěťových zkoušek pro jednotlivé hladiny sítě [2]. Dodržením hladiny sítě tak získáme rozměry odpojovače.

### 3.1.2 Izolační médium

Izolačním médiem rozumíme prostředí jako izolaci v rozpojené kontaktní dráze. Izolace proti zemi se provádí pevnými izolanty. O volbě izolačního média rozhodují technické, a technologické možnosti výrobce. Izolační médium pak zpravidla rozhoduje o provedení, umístění, hmotnosti, rozměru a dalších vlastností elektrického přístroje.

Nejčastější provedení odpojovače z hlediska provedení:

1. **Nezapouzdřený**

Používá se v provedení pro vnitřní a venkovní prostředí, se vzduchem jako izolačním médiem.

2. **Zapouzdřený**

Použití vypovídá z názvu, tedy v zapouzdřených rozvodnách, kde se nejčastěji jako izolační médium používá plyn SF<sub>6</sub>.

## 3.2 Proudovodná dráha

Základní částí odpojovače, tak aby mohl rozpojovat a spojovat elektrický obvod, je právě proudovodná dráha. Proudovodnou dráhu tak tvoří všechny díly přístroje zajišťující přenos proudu. Tyto díly jsou pak provozem namáhány dvojím způsobem, tepelně a mechanicky.

Z definice odpojovače pak hovoří samo za sebe, že odpojovač musí odolat nejen tepelným a elektrodynamickým silám při průchodu jmenovitého proudu, ale hlavně musí být schopen přenést zkratový proud do doby, než tento proud vypne nadřazený vypínač. Odpojovač tak dimenzujeme z hlediska zkratového proudu a to tak, aby odolal tepelným a elektrodynamickým účinkům při průchodu zkratového proudu.

V počátku návrhu, kdy se rozhodujeme pro průřez proudovodné dráhy, vycházíme z předběžné proudové hustoty 1,5-4 A/mm<sup>2</sup>. V případě velkého průřezu, můžeme například zvolit paralelní uspořádání, aby se procházející proud rozdělil na polovinu.

V případě kontroly na oteplení, které vznikne v důsledku průchodu proudu, tak aby byla proudovodná dráha navržena ekonomicky, nemělo by oteplení představovat nižší hodnotu jak 95% dovoleného oteplení. Na druhou stranu nesmí zase překročit navržená dráha toto dovolené oteplení.

Průchod zkratového proudu způsobuje mechanické namáhání, a protože uvažujeme nejhorší případ, dimenzujeme proudovodnou dráhu právě na velikost zkratového proudu. Na tuto velikost musí být navrženy jak proudovodná dráha, tak podpěrné izolátory a připojovací svorky. Dále musíme uvážit rovnoběžné uspořádání vodičů, kdy právě v tomto uspořádání roste velikost elektrodynamických sil s kvadrátem proudu.

Nejdůležitější částí proudovodné dráhy jsou kontakty. Z hlediska rozhodování jaký materiál použijeme, by mělo rozhodovat prostředí, druh kontaktu a četnost spínání a jiné faktory, a na základě vlastností používaných materiálu jako je elektrická pevnost, vodivost, odolnost proti otěru a dalších materiálových vlastností, pak volíme nejvhodnější materiál.

Kontaktní styk v proudovodné dráze nám charakterizuje přechodový, nebo tzv. stykový odpor. Ať se může zdát, že vlivem přitlačné síly dosedají materiály k sobě plnou plochou, není tomu tak. Dvě takové části se dotýkají jen několika styčnými body, a to důsledkem mikroskopických nerovností materiálů.

Díky deformovatelnosti materiálů se styčné body rozšiřují na styčné plochy a tlak na ně působící se mění na konečnou měrnou hodnotu. Průchodem proudu dochází k deformaci a soustředění se tohoto proudu do stykových plošek, vznikají tzv. proudové úžiny, kde dochází ke skokové změně průřezu. Vlivem změny průřezu se pak zvyšuje elektrický odpor. Celkový elektrický odpor dále také ovlivňuje vznik korozních vrstev, která je reakcí kovů s prvky okolní atmosféry. Dalšími vrstvami, které se mohou na kontaktech objevit, jsou nanesené tuky. Zatímco v prvním případě šlo o vrstvy chemického původu, tak v druhém jde o vrstvy mechanického původu, a souhrnně obě vrstvy nazýváme cizí vrstvy na kontaktech. Oteplování kontaktů má pak vliv na tvorbu kysličníkové vrstvy v kontaktním styku. Následkem je zvýšení stykového odporu. Vlivem zvýšení stykového odporu dojde k dalšímu nárůstu teploty a může dojít ke svaření kontaktů. Při návrhu se tedy snažíme tento stykový odpor snížit a to tak, aby vlivem působení elektrodynamických sil se síla působící na kontaktní styk zvětšovala, v opačném případě musíme navrhnout dostatečně silnou pružinu, která působí na kontaktní styk silou a tím snižuje přechodový odpor.

Nejpoužívanějšími kontaktními materiály jsou měď a stříbro. V případě mědi se působením kyslíku vytváří uhlíkatý měďnatý, na stříbre se tvoří měkké kysličníky. Nižší hodnota teploty měknutí materiálu je výhodné z hlediska zvětšení stykové plošky a tím klesající ztráty na přechodovém styku. Proto stříbrné, nebo postříbřené kontakty mohou být tak více přetěžovány.[4]

Proudovodná dráha mého navrhovaného odpojovače bude tedy navržena z mědi, roubík bude mít navíc povrchovou úpravou postříbřením velmi tenké vrstvy, z důvodu výše uvedených.

### 3.3 Pohon motoru

Pohon motoru slouží v odpojovači k přechodu ze stavu zapnuto, do stavu vypnuto a naopak. Jako pohon se používá elektrický, tlakovzdušný, nebo hydraulický. Ten je pak vhodným mechanismem spojen s ramenem odpojovače a spolu provedou přechod z jednoho stavu do druhého. Při návrhu odpojovače je potřeba určit velikost momentu, který je potřebný pro spolehlivou funkci odpojovače. Návrh provedení mechanismu není součástí diplomové práce, jen je třeba znát tíhu jednotlivých součástí při výpočtu potřebného momentu, aby odpojovač spolehlivě přecházel z jednoho stavu do druhého. V závěru diplomové práce proto provedu výpočet momentu s velmi zjednodušeným návrhem mechanického soustrojí.

## 4 NÁVRH ODPOJOVAČE VN

Zadané charakteristické hodnoty k vypracování návrhu odpojovače jsou uvedeny v tabulce 4-1

**Tab. 4-1** Zadané hodnoty

Název	Označení	Hodnota
Jmenovité napětí	$U_n$	6 kV
Jmenovitý proud	$I_n$	1250 A
Jmenovitý dynamický výdržný proud	$I_D$	25 kA
Ekvivalentní oteplovací proud	$I_{th}$	25 kA

### 4.1 Návrh izolace odpojovače

Při návrhu vycházím z empirických vztahů pro jednotlivé konfigurace elektrod a pro jednotlivé napěťové zkoušky [1; str. 14, tab. I-17]. Jako izolant bude použit vzduch.

#### 4.1.1 Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi póly odpojovače krátkodobou zkouškou výdržným střídavým napětím $U_D$ [1; str. 97]

Charakter pole mezi póly sousedních fází se blíží konfiguraci dvou izolovaných hrotů. Empirický vzorec pro průrazné napětí  $U_p$  je:

$$U_p \approx 3,14d + 14(1 - e^{-0,25d}) \quad (4.1.1-1)$$

Přibližná velikost nepřeskokové vzdálenosti  $d''$ , při zanedbání exponenciálního tvaru a při velikosti zkušební napětí střídavé zkoušky  $U_d = 20 \text{ kV}$  je:

$$d_1'' \approx \frac{U_d - 14}{3,4} = \frac{20 - 14}{3,4} = 1,76 \text{ cm} \quad (4.1.1-2)$$

Protože jsem zanedbal exponenciální tvar, je vypočtená vzdálenost jen přibližná, a proto provedu její korekci tak, že dosadím přibližnou velikost nepřeskokové vzdálenosti  $d_1''$  do úplného empirického vzorce podle 3.1.1-1:

$$\begin{aligned} U_p' &\approx 3,14d_1'' + 14(1 - e^{-0,25d_1''}) = 3,14 \cdot 1,76 + 14(1 - e^{-0,25 \cdot 1,76}) = \\ &= 10,99 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.1-3)$$

Nyní porovnáím velikost vypočteného průrazného napětí  $U_p'$  při nepřeskokové vzdálenosti  $d_1'' = 1,76 \text{ cm}$  a velikost zkušební napětí při krátkodobé střídavé zkoušce výdržným napětím  $U_D = 20 \text{ kV}$ . Aby nepřeskoková vzdálenost vyhověla, musí platit podmínka, že vypočtené průrazné napětí musí být větší než velikost výdržného napětí při střídavé zkoušce, tedy  $U_p' > U_D$ . Vzdálenost  $d_1'' = 1,76 \text{ cm}$  tedy nevyhovuje podmínce z hlediska velikosti zkušební výdržného napětí při krátkodobé střídavé zkoušce. Velikost  $U_p' = 10,99 \text{ kV}$  je přibližně dvojnásobně menší než velikost zkušební výdržného napětí při střídavé zkoušce  $U_D = 20 \text{ kV}$ .

Proto zvětším přeskokovou vzdálenost na  $d'_1 = 3,5 \text{ cm}$  a opět provedu korekční výpočet průrazného napětí  $U'_p$  podle vzorce 4.1.1-1:

$$\begin{aligned} U'_p &\approx 3,14d'_1 + 14 \left(1 - e^{-0,25d'_1}\right) = 3,14 \cdot 3,5 + 14(1 - e^{-0,25 \cdot 3,5}) = \\ &= 20,06 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.1-4)$$

Opět provedu srovnání obou velikostí napětí a zjišťuji, že vzdálenost  $d'_1 = 3,5 \text{ cm}$  při konfiguraci elektrod dvou izolovaných hrotů už vyhovuje z hlediska krátkodobé zkoušky výdržným napětím ( $20,06 \text{ kV} > 20 \text{ kV}$ ).

Nepřeskokovou vzdálenost  $d'_1 = 3,5 \text{ cm}$  dále překontroluji vzorcem vhodnějším pro krátkodobou zkoušku střídavým výdržným napětím, a to vzorcem pro velikost průrazného napětí při konfiguraci elektrod kladný hrot – uzemněný hrot.

$$\begin{aligned} U_p &\approx 6,7d'_1 + 25 \left(1 - e^{-0,25d'_1}\right) = 6,7 \cdot 3,5 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 3,5}) = \\ &= 38,03 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.1-5)$$

Velikost vypočteného průrazného napětí ukazuje, že i tato konfigurace elektrod vyhovuje zkoušce krátkodobým střídavým výdržným napětím ( $38,3 > 20 \text{ kV}$ ).

#### 4.1.2 Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi póly odpojovače zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu $U_p$ [1; str. 98]

Nyní musím ověřit, jestli vypočtená nepřeskoková vzdálenost  $d'_1 = 3,5 \text{ cm}$  vyhoví také zkoušce výdržným napětím při atmosférickém impulsu. Velikost výdržného napětí při atmosférickém impulsu pro zkoušku mezi póly jednotlivých fází odpojovače je podle normy [2]  $U_p = 40 \text{ kV}$  (Tab.3.1.1 - 1). Ověření, zda vzdálenost vyhovuje, provedu opět porovnáním velikostí zkušební napětí a velikosti průrazného napětí při konfiguraci elektrod kladný hrot-uzemněný hrot vypočteného výše (4.1.1-5). Porovnáním velikostí napětí zjišťuji, že nepřeskoková vzdálenost  $d'_1 = 3,5 \text{ cm}$  zkoušce výdržným napětím při atmosférickém impulsu nevyhovuje ( $40 \text{ kV} > 38,03 \text{ kV}$ ). Navíc výpočtový vzorec udává jen poloviční průrazné napětí. Proto hodnotu přeskokové vzdálenosti s ohledem na charakter výpočtového vzorce (3.1.1-5) upravím a to tak, aby průrazné napětí vyšlo alespoň 110% z velikosti zkušební napětí atmosférickým impulsem, tedy  $U_p \geq 110\% \cdot U_{ZK}$ .

Zvětšíme tedy přeskokovou vzdálenost na  $d_1 = 4,2 \text{ cm}$ . Velikost průrazného napětí je pak:

$$\begin{aligned} U_p &\approx 6,7d_1 + 25 \left(1 - e^{-0,25d_1}\right) = 6,7 \cdot 4,2 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 4,2}) = \\ &= 44,39 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.2-1)$$

Velikost průrazného napětí  $U_p = 44,39 \text{ kV}$  vyhovuje podmínce  $U_p \geq 110\% \cdot U_{ZK}$ , přesněji velikost průrazného napětí  $44,39 \text{ kV}$  je 111% z velikosti přeskokového napětí udávané normou [2] pro jmenovité přeskokové napětí při atmosférickém impulsu. S ohledem na charakter pole, kde elektrodami nejsou ostré hrany, ale úzké plošky, a tudíž pole není extrémně nehomogenní, se naše určená a vypočtená nepřeskoková vzdálenost  $d_1 = 4,2 \text{ cm}$  zdá být vyhovující. Norma [2] ovšem doporučuje vzdálenost mezi živými částmi 250 mm, ale na druhou stranu vychází z napěťových hladin 12 a 17,5 kV. Doporučená vzdálenost je přibližně šestkrát větší, než hodnota vypočtená, a proto určím minimální vzdálenost na  $d_{1MIN} = 7 \text{ cm}$ . S ohledem na nejvyšší napěťovou hladinu 7,2 kV, velikost doporučených vzdáleností mezi póly, dále s ohledem na doporučené rozteče přípojníc ještě vzdálenost mezi póly upravím na konečných  $d_1 = 15 \text{ cm}$ .



#### 4.1.3 Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti mezi živými částmi odpojovače a zemí zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu $U_P$ [1; str. 98]

Na základě předešlých výpočtů, kde mi přeskoková vzdálenost vycházela vždy větší při zkoušce výdržným napětím při atmosférickém impulsu, než při krátkodobé zkoušce výdržným střídavým napětím můžu usoudit, že v dalších výpočtech přeskokových vzdáleností již vystačím jen se zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu.

Pro určení minimální nepřeskokové vzdálenosti vycházím ze vzorce pro konfiguraci kladný hrot – uzemněná rovina při rázové pevnosti. Nejkratší přímou vzdálenost kolmo přes izolátor představuje výška izolátorové podpěrky, která je podle výrobce daného izolátoru  $H = 95 \pm 1 \text{ mm}$  (Příloha P3). Velikost přeskokového napětí  $U_P$ , při zadání nejkratší vzdálenosti, tedy  $H = 94 \text{ mm}$  je:

$$\begin{aligned} U_P &\approx 5,5H + 15(1 - e^{-0,25 \cdot H}) = 5,5 \cdot 9,4 + 15(1 - e^{-0,25 \cdot 9,4}) = \\ &= 65,27 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.3-1)$$

Velikost vypočteného přeskokového napětí  $U_P$  je větší než velikost výdržného napětí při atmosférickém impulsu. Přímá vzdálenost mezi proudovou dráhou a zemí, je dostatečná a výška vybraného izolátoru vyhovuje z hlediska zkoušky výdržným napětím při atmosférickém impulsu.

#### 4.1.4 Určení minimální nepřeskokové vzdálenosti v rozpojené kontaktní dráze odpojovače výdržným napětím při atmosférickém impulsu $U_P$ [1; str. 98]

Elektrické pole v rozpojené kontaktní dráze má charakter pole mezi hroty. Empirický vztah pro případ dvou neuzemněných hrotů není popsán, proto použiji stejný vzorec jako při určování nepřeskokových vzdáleností mezi póly sousedních fází, tedy vzorec v konfiguraci elektrod kladný hrot – uzemněný hrot (4.1.1-5). Přitom vycházím z velikosti výdržného napětí při zkoušce atmosférickým impulsem pro rozpojenou kontaktní dráhu odpojovače, jehož velikosti je  $70 \text{ kV}$  podle příslušné napěťové zkoušky uváděné v tabulce 3.1.1-1. Velikost přeskokového napětí  $U_P$  při výše vypočtené a určené nepřeskokové vzdálenosti  $d_{1MIN} = 7 \text{ cm} = d_2$  je pak:

$$\begin{aligned} U_P &\approx 6,7d_2 + 25(1 - e^{-0,25d_2}) = 6,7 \cdot 7 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 7}) = \\ &= 67,56 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.4-1)$$

Porovnám velikost vypočteného přeskokového napětí a velikost výdržného napětí při zkoušce atmosférickým impulsem, a vidím, že nepřeskoková vzdálenost nevyhovuje. Zvýším tedy nepřeskokovou vzdálenost na  $d_2 = 10 \text{ cm}$  a přepočítám velikost přeskokového napětí:

$$\begin{aligned} U_P &\approx 6,7d_2 + 25(1 - e^{-0,25d_2}) = 6,7 \cdot 10 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 10}) = \\ &= 89,95 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.4-2)$$

Požadavkem normy [2] je, aby velikost přeskokového napětí  $U_P$  v rozpojené kontaktní dráze bylo minimálně o 15% větší, než přeskokové napětí mezi živými částmi a zemí. Velikost přeskokového napětí  $U_P = 89,95 \text{ kV}$  v rozpojené kontaktní dráze je o 28,5% větší než samotná velikost výdržného napětí při zkoušce atmosférickým impulsem a o 37,8% větší než přeskokové napětí mezi živými částmi a zemí. Vzdálenost  $d_2 = 10 \text{ cm}$  tedy vyhovuje jak z hlediska zkoušky výdržným napětím při atmosférickým impulsu, tak i z hlediska požadavku normy.

#### 4.1.5 Určení minimální nepřeskokové povrchové dráhy a nastavení vzdálenosti koordinačních hrotů [1; str. 99]

Při výpočtu nepřeskokové vzdálenosti mezi živými částmi a zemí odpojovače jsem ověřil zkouškou výdržným napětím při atmosférickém impulsu. Nejmenší vzdálenost kolmo přes izolátor činí výška vybraného izolátoru (Příloha P3). Dále musíme u vybraného izolátoru ověřit jeho délku při povrchu, tzv. přeskokovou povrchovou dráhu.

Minimální přeskokovou povrchovou dráhu  $d'_3$  určíme ze vzorce:

$$U_p \approx 5,6d_3 + 20(1 - e^{-0,1d_3}) \quad (4.1.5-1)$$

Dráze  $d'_3 = 5,7 \text{ cm}$  odpovídá velikosti přeskokového napětí  $U_p = 40,61 \text{ kV}$ , tedy o něco málo větší, než výdržné napětí při zkoušce atmosférickým impulsem. Velikost dráhy ovšem nemůžeme považovat za minimální, z důvodu výpočtového vzorce, který udává jen poloviční průrazné napětí. Proto dráhu zvětšíme přibližně o 10%, tedy na  $d'_3 = 6,3 \text{ cm}$  a velikost přeskokového napětí  $U_p = 44,63 \text{ kV}$  pak představuje 112% velikosti zkušební napětí. Dále musíme minimální povrchovou dráhu ověřit zkouškou výdržným střídavým napětím, jejíž charakter právě nepříznivě ovlivňuje povrchové namáhání izolátoru, a to především díky době přiloženého napětí (izolace musí odolat jedno minutovému namáhání výdržným napětím). Velikost přeskokového napětí střídavé zkoušky je pak:

$$\begin{aligned} U_p &\approx 3d_3 + 25(1 - e^{-0,1d_3}) = 3,6,3 + 25(1 - e^{-0,1,6,3}) = \\ &= 30,59 \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1.5-2)$$

, a představuje 153% zkušební napětí. Délku přeskokové povrchové dráhy  $d'_3 = 6,3 \text{ cm}$  tedy mohu označit za minimální. Protože u vybraného izolátoru neznám výšku jednoho žebra, a ani poloměr při náběhu na další žebro, musím uvěřit udané hodnotě výrobce  $d_3 = 15 \text{ cm}$ , která je větší, než minimální, a tedy vyhovující.

Navíc izolátorové podpěrky musím chránit před účinky elektrického výboje tzv. koordinačními hroty. Jejich přeskokovou vzdálenost nastavujeme tak, aby představovala nejslabší místo izolace celého pólu. Vyjdu z výšky izolátoru  $H = 9,4 \text{ cm}$ , a podle vzorce 4.1.5-1 je přeskokové napětí  $U_p = 64,83 \text{ kV}$  a podle vzorce 4.1.5-2 je  $U_p = 43,43 \text{ kV}$ . Vzdálenost koordinačních hrotů  $d_4$  volím tak, aby její průrazná pevnost pro jednotlivé napěťové zkoušky ležela v intervalu:

- 20 kV až 43,43 kV pro případ zkoušky výdržným střídavým napětím
- 40 kV až 64,83 kV pro případ zkoušky atmosférickým impulsem

Přitom vycházím z empirických vzorců pro konfiguraci hrot-uzemněný hrot, kde pro zkoušku střídavým napětím platí [1; str. 99]:

$$U_{Pstř} \approx 3,7d_4 + 19(1 - e^{-0,3, d_4}) \quad (4.1.5-3)$$

, a pro zkoušku výdržným napětím při atmosférickém impulsu platí:

$$U_{Patm} \approx 6,7d_4 + 25(1 - e^{-0,25, d_4}) \quad (4.1.5-4)$$

Podle výpočtů pro jednotlivé vzdálenosti uvedené v tabulce 4.1.5-1 vyhovuje podmínce intervalu velikost  $d_4 = 6,6 \text{ cm}$ .

Tab. 4.1.5-1nastavení koordinačního hrotu

$d_4[cm]$	4,6	6,6	13
$U_{pstř}[kV]$	39,89	40,8	41,24
$U_{patm}[kV]$	62,83	64,42	65,2

## 4.2 Návrh proudové dráhy odpojovače, rozměry a působící síly

Proudovou dráhu navrhovaného odpojovače tvoří:

- roubík, který představuje pevný kontakt-oboustranně
- připojovací pás - oboustranně
- dvoudílný nůž, který současně tvoří pohyblivý kontakt – z obou stran

Díly proudové dráhy jsou vyrobeny z elektrovedné polotvrdé mědi, kde roubík je navíc povrchově upravena tenkou vrstvou postříbení.

### 4.2.1 Velikost krátkodobého výdržného proudu a efektivní velikost dynamického výdržného proudu

Zadaná hodnota  $I_D = 25 \text{ kA}$  představuje hodnotu proudu, kterou musí za každých okolností odpojovač být schopen bez poškození přenést. Vyjadřuje maximální hodnotu první amplitudy asymetrické vlny zkratového proudu, a velikost  $I_D$  by měla být udaná výrobcem na štítku odpojovače. Velikost tedy představuje nejnejpříznivější možný případ průběhu proudu při zapnutí odpojovače při velikosti jmenovitého krátkodobého výdržného proudu  $I_k$ .

Velikost  $I_k$ , kterou také udává výrobce na štítku odpojovače, můžu určit ze vztahu[1; str. 101]:

$$I_k = \frac{I_D}{1,8\sqrt{2}} = 9820,93 \text{ A} \cong 10 \text{ kA} \quad (4.2.1-1)$$

Efektivní velikost první proudové vlny s touto amplitudou je[1; str. 100]:

$$I_{Def} = 1,67 \cdot I_k = 1,67 \cdot 10000 \cong 16,7 \text{ kA} \quad (4.2.1-2)$$

### 4.2.2 Určení průřezu připojovacího pásu odpojovače

Jmenovitý proud navrhovaného odpojovače je  $I_N = 1250 \text{ A}$ . S ohledem na jeho poměrně větší velikost, zvolím měrné proudové zatížení  $\sigma = 2,5 \text{ A/mm}^2$ . Minimální průřez připojovacího pásu je potom [1; str. 99]:

$$S = \frac{I_N}{\sigma} = \frac{1250}{2,5} = 500 \text{ mm}^2 \quad (4.2.2-1)$$

Průřez připojovacího pásu musí odpovídat normě [2], tak aby odpovídal předepsané velikosti. Zvolíme tedy průřez na 60x10 mm. Měrné proudové zatížení je pak [1; str. 100]:

$$\sigma = \frac{I_N}{S} = \frac{1250}{60 \cdot 10} = 2,08 \text{ A.mm}^{-2} \quad (4.2.2-2)$$

Průřez připojovacího pásu se zdá být vyhovující, každopádně se průřez dá kompenzovat vyvrtáním otvoru. Tato úprava vede ke zmenšení průřezu, ale na druhou stranu k vyššímu proudovému zatížení

a tím také k většímu tepelnému zatížení, a zároveň ke snížení odolnosti proti dynamickým silám, vznikající vlivem průchodu zkratového proudu. V případě že nevyhovíme účinkům zkratového proudu, tak právě naopak budeme muset průřez zvětšit.

#### 4.2.3 Určení průřezu pohyblivého kontaktu

Pohyblivý kontakt budou tvořit dva paralelní nože. Procházející proud se tedy rozdělí na polovinu, a při stejném zvoleném měrném proudovém zatížení jako v případě určování průřezu přípojovacího pásu, tedy  $\sigma = 2,5 \text{ A/mm}^2$ , je pak minimální průřez jednoho nože [1; str. 100]:

$$S = \frac{I_N}{2 \cdot \sigma} = \frac{1250}{2 \cdot 2,5} = 250 \text{ mm}^2 \quad (4.2.3-1)$$

Nyní si zvolím průřez jednoho nože a to na průřez 60x5 mm. Jeho měrné proudové zatížení je pak [1; str. 100]:

$$\sigma = \frac{I_N}{2 \cdot S} = \frac{1250}{2 \cdot 60 \cdot 5} = 2,08 \text{ A.mm}^{-2} \quad (4.2.3-2)$$

#### 4.2.4 Určení průřezu roubíku

Na základě dodržení proudového zatížení  $\sigma = 2,08 \text{ A.mm}^2$ , a při znalosti vnitřního průměru roubíku (průměr díry  $\varnothing = 13 \text{ mm}$  pro šroub, kterým připevním roubík k přípojovému pasu, a zároveň k uchycení celku k izolátorové podpěře) určíme průměr roubíku:

$$D_{Vnější} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_N}{2,08 \cdot \pi} + D_{vnitřní}^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1250}{2,08 \pi} + 13^2} = 30,56 \approx 31 \text{ mm} \quad (4.2.4-1)$$

Měrné proudové zatížení po zaokrouhlení:

$$\sigma = \frac{4 \cdot I_N}{\pi \cdot (D_{Vnější}^2 - D_{vnitřní}^2)} = \frac{4 \cdot 1250}{\pi (31^2 - 13^2)} = 2,01 \text{ A.mm}^2 \quad (4.2.4-2)$$

Roubík představuje místo styku s pohyblivým kontaktem. Jedná se o krátkou dráhu se značně nerovnoměrným průběhem proudového pole, kde dochází k nerovnoměrnému proudovému zatížení průřezu. Proto je nižší proudová hustota žádoucí.

#### 4.2.5 Určení minimální přitlačné síly na kontaktní styk

V navrhovaném odpojovači najdeme v jeho konstrukci kontaktní styk přímkový a plošný. Zatímco tzv. kluzný přímkový styk se nachází jak na kloubovém tak i na pohyblivém kontaktu, tak mezi praporky a přípojovacími přípojnými jde o tzv. styk pevný plošný.[5]

##### 4.2.5.1 Kluzný kontaktní styk přímkový

V navrhovaném odpojovači jsou tři. První kontaktní styk je na straně odpojovače, kde je pohyblivý kontakt, tvořený dvěma paralelními noži, připevněn pomocí kloubu ve tvaru U-profilu. Druhý a třetí kontaktní styk tvoří tyto paralelní nože a roubík. A zatímco u jednoho kontaktu nedojde k rozpojení, u druhého dojde k úplnému oddálení.

Prvním typem kontaktu se z hlediska kontaktu proudové dráhy nemusím zabývat. Kloub je ve tvaru U-profilu, a je přes něj upevněn pohyblivý kontakt, je vyroben z oceli, a proto povede minimum proudu.

Z hlediska kontaktů vlastností proudové dráhy, tedy určení stykového odporu a jeho minimální přitlačné síly, je důležitý jen druhý a třetí případ kontaktního styku. Začneme třetím případem, kdy u pohyblivého kontaktu a roubíku charakterizující pevný kontakt dochází k úplnému rozpojení. Minimální

potřebný tlak, který je potřeba vyvolat pružinami určím nejen pro bezporuchový stav, kdy kontakty odpojovače prochází jen jmenovitý proud, ale hlavně pro případ, kdy kontakty odpojovače prochází zkratový proud a hrozí jejich svaření.

### 1) Bezporuchový stav - kontaktem prochází jmenovitý proud

Výpočet provedu s určitým zjednodušením, kdy budu vycházet z předpokladu, že proud se rovnoměrně rozloží do paralelních proudových drah měděných nožů, tedy předpokládám, že horní i dolní styk má stejný charakter.

Proud procházející kontaktem se díky paralelnímu uspořádání nožů pohyblivého kontaktu rozdělí na polovinu a jeho velikost je [1; str. 101]:

$$I_{05.kont} = 0,5 \cdot I_N = 0,5 \cdot 1250 = \mathbf{625\ A} \quad (4.2.5.1-1)$$

Bezpečná provozní velikost stykového odporu postříbřených měděných nožů a postříbřeného roubíku je přibližně [1; str. 101], se zanedbáním tenké vrstvy postříbření:

$$R_{S1} \approx \frac{U_{M\check{k}}}{2 \cdot I_{05.kont}} = \frac{0,12}{2 \cdot 625} = 0,000096 = \mathbf{0,96 \cdot 10^{-4}\ \Omega} \quad (4.2.5.1-2)$$

, kde  $U_{M\check{k}}$  představuje hodnotu napětí na mezi měknutí použitého materiálu, tedy pro měď je velikost napětí 0,12 V [1; str. 35; tab. 2-10]

Velikosti stykového odporu  $R_{S1}$  pak odpovídá přibližný konstantní tlak o velikosti [1; str. 101]:

$$F_{k1} \approx \left( \frac{k_{Cu}}{R_{S1}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{8 \cdot 10^{-4}}{0,96 \cdot 10^{-4}} \right)^{\frac{1}{0,7}} = \mathbf{20,68\ N} \quad (4.2.5.1-3)$$

, kde  $n = 0,7$  je činitel pro přímkový styk [1; str. 33; tab. 2-9]. Předpokladem hodnoty pro činitel druhu materiálu  $k_{Cu} = 8 \cdot 10^{-4}$  je, že při přímkovém kluzném styku dojde postupně k otěru postříbření pevného kontaktu, zároveň však kluzným pohybem dochází k čištění měděných povrchů jak pohyblivých nožů, tak pevného kontaktu.

### 2) Poruchový stav – kontaktem prochází zkratový proud

Proud, který prochází kontaktem při zkratu je opět vlivem uspořádání paralelních nožů poloviční, tedy [1; str. 101]

$$I_{D05.kont} = 0,5 \cdot I_D = 0,5 \cdot 25000 = \mathbf{12500\ A} \quad (4.2.5.1-4)$$

Při průchodu zkratového proudu je stykový odpor kontaktů na mezi sváření přibližně [1; str. 101]:

$$R_{S2} \approx \frac{U_{svař}}{2 \cdot I_{D05.kont}} = \frac{0,43}{2 \cdot 12500} = \mathbf{1,72 \cdot 10^{-5}\ \Omega} \quad (4.2.5.1-5)$$

, kde  $U_{svař}$  představuje hodnotu napětí na mezi svaření použitého materiálu, tedy pro měď je velikost napětí 0,43 V [1; str. 35; tab. 2-10]

Minimální velikost přítláčné síly  $F_{k2}$  při průchodu zkratového proudu musí být:

$$F_{k2} \geq \left( \frac{k_{Cu}}{R_{S2}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{8 \cdot 10^{-4}}{1,72 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{0,7}} = \mathbf{241,12\ N} \quad (4.2.5.1-6)$$

V případě styku, kdy nedojde mezi pevným a pohyblivým kontaktem k rozpojení, platí stejná minimální velikost přítláčné síly jako pro styk při úplném oddálení, tedy  $F_{k3} = F_{k2} = \mathbf{241,12\ N}$ .

#### 4.2.5.2 Kontaktní styk pevný plošný

Jedná se o styk mezi připojovacím pasem a přípojnici. Rozdíl proti předchozímu výpočtu minimální přitlačné síly je, že u tohoto styku nedojde k rozdělení proudu. Protože jde o připojení měděného pásu a měděné přípojnice, je materiálová konstanta stejná jako v předchozím případě. V případě připojení hliníkové přípojnice, bylo by u přípojnice nutné tzv. pošopování mědí. Dalším rozdílem je v činiteli – jde o plošný styk, volím činitel  $n = 1$ . [1; str. 35; tab. 2-10].

##### 1) Bezporuchový stav - kontaktem prochází jmenovitý proud

Bezpečná provozní velikost stykového odporu měděného vodiče na měděném připojovacím pásu je přibližně:

$$R_{S3} \approx \frac{U_{Mek}}{2.I_N} = \frac{0,12}{2.1250} = 0,000048 = 4,8 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (4.2.5.2-1)$$

Velikosti stykového odporu  $R_{S3}$  pak odpovídá přibližně konstantní tlak o velikosti:

$$F_{k3} \approx \left( \frac{k_{Cu}}{R_{S3}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{8 \cdot 10^{-4}}{4,8 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{1}} \approx 16,7 \text{ N} \quad (4.2.5.2-2)$$

##### 2) Poruchový stav – kontaktem prochází zkratový proud

Při průchodu zkratového proudu je stykový odpor kontaktů na mezi sváření přibližně:

$$R_{S4} \approx \frac{U_{svař}}{2.I_D} = \frac{0,43}{2.25000} = 8,6 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4.2.5.2-3)$$

Minimální velikost přitlačné síly  $F_{k2}$  průchodem zkratového proudu musí být:

$$F_{k4} \geq \left( \frac{k_{cu}}{R_{S4}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{8 \cdot 10^{-4}}{8,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{1}} = 93,11 \text{ N} \quad (4.2.5.2-4)$$

Velikost přitlačné síly  $F_{k4}$  musí být vyvinuta spojovacími šrouby, kterými bude připojena přípojnice přivádějící a odvádějící proud z odpojovače.

Musím upozornit, že tímto postupem výpočtu minimálních přitlačných sil na kontakt je jejich velikost pouze orientační. Důvodem je fakt, že velikosti jsou odvozeny jen z napětí, a proto je považuji pouze za krajní, ještě přijatelné velikosti. V případné nutnosti snížení oteplení proudové dráhy, hlavně se to týká svařitelnosti kontaktů, nebo s ohledem na nepříznivé působení elektrodynamických sil, můžu tyto velikosti přitlačných sil ještě upravit, přesněji navýšit.

#### 4.2.6 Elektrodynamické síly

Při výpočtu elektrodynamických sil budu vycházet ze zadané hodnoty proudu  $I_D = 25 \text{ kA}$ .

##### 4.2.6.1 Odpudivé síly v proudové úžině

Nejprve učím sílu, která působí mezi stykem roubík - nože odpojovače. Jedná se o sílu, která působí proti jejich kontaktnímu styku. Síla tak působí proti velikosti přitlačné síle působící na kontakt, a tím proto může negativně ovlivnit jejich velikost stykového odporu.

Je zjevné, že velikost přitlačné síly na kontakt mohou snížit jen síly vyvolané soustředěním proudnic v úžině nože. Jejich velikost závisí na náhodné velikosti počtu stykových míst a jejich rozložení podél stykové povrchy. Proto výpočtem určím jen jejich přibližnou velikost o velikosti řádu. Při výpočtu budu uvažovat jen takový počet  $n$  stejných kruhových plošek, kolik proudových úžin se vejde na délku  $b$  stykového povrchu příslušného kontaktu.

Pro předpokládaný počet stykových míst  $n$ , podél stykové povrchy o délce  $b = 60 \text{ mm}$ , a tloušťce vypínacího nože  $a = 5 \text{ mm}$  je [1; str. 102]:

$$n = \text{entier} \frac{b}{2.a} = \frac{60}{2.5} = 6 \quad (4.2.6.1-1)$$

Pro průměr  $d_n$  dílčí kruhové stykové plochy [1; str. 102]:

$$d_n = \sqrt{\frac{4.F_{k2}}{n.\pi.H}} = \sqrt{\frac{4.241,12}{6.\pi.5.10^8}} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,32 \text{ mm}} \quad (4.2.6.1-2)$$

,kde  $H = 5 \cdot 10^8 \text{ Pa}$  je tvrdost materiálu (pevnost v tlaku) [1; str. 35; tab. 2-10]

Pro výslednou odpudivou sílu  $F_u$  všech jednotlivých úžin  $F_{u1}$  pro jeden kontakt nože a měděného pásu, kterou vyvolá proud  $I_d$  pak platí [1; str. 102]:

$$F_u = n.F_{u1} \quad (4.2.6.1-3)$$

Je třeba si uvědomit, že jedním kontaktem poteče jen polovina proudu  $I_D$ , protože vlivem paralelního uspořádání pohyblivého kontaktu se rozdělí na polovinu. Proto každou ploškou o průměru  $d_n$  poteče proud o velikosti  $I = \frac{I_D}{2n}$  a výsledná odpudivá síla  $F_u$  všech úžin dohromady pro jeden kontakt nože je [1; str. 102]:

$$F_u = F_{u1}n = n \cdot 10^{-7} \left( \frac{I_D}{2.n} \right)^2 \cdot \ln \left( \frac{2.a}{d_n} \right) = 10^{-7} \cdot \frac{25000^2}{4.6} \cdot \ln \left( \frac{2.5}{0,32} \right) =$$

$$\cong \mathbf{9 \text{ N}} \quad (4.2.6.1-4)$$

#### 4.2.6.2 Přitažlivé síly mezi paralelními noži

Jedná se o sílu, která působí mezi noži odpojovače. Tato síla se projevuje tak, že dané nože navzájem k sobě přitahuje. Aby nedošlo k deformačnímu prohnutí těchto paralelních nožů, umístím mezi nože bezpečnostní ocelové rozpěrky, které budou nože držet jednak u sebe, a zároveň zabránit jejich deformačnímu prohnutí.

Při zvolené délce nože, neuvažuji přesahy nožů za kontaktem s roubíkem, je  $p = 30 \text{ cm}$ . Pro sílu  $F_{II}$  mezi paralelními noži, při osově vzdálenosti  $a' = 3,6 \text{ cm}$  mezi noži, kterou vyvolá proud  $I_D$  protékající délkou nože  $p$  v jeho úseku délky  $l = p - m = 30 - 20 = 10 \text{ cm}$ , tedy mezi dotykovým místem a čepem bezpečnostní ocelové rozpěrky [1; str. 105]:

$$F_{II} = 10^{-7} \cdot \frac{I_D^2}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{p-m}{a'} \right)^2 + 1} - 1 \right] = 10^{-7} \cdot \frac{25000^2}{2} \cdot \left[ \sqrt{\left( \frac{10}{3,6} \right)^2 + 1} - 1 \right] =$$

$$\cong \mathbf{61 \text{ N}} \quad (4.2.6.2-1)$$

Dále musím překontrolovat vlastní mechanický kmitočet vodičů, tvořené paralelními noži, upevněné bezpečnostními ocelovými rozpěrkami. Je nepřijatelný, aby se vlastní kmitočet blížil k 50 Hz, a 90-110 Hz. V takovém případě bych musel buď změnit průřez nože, nebo změnit jeho délku, přesněji upravit rozteče bezpečnostních rozpěrek.

Vlastní mechanický kmitočet vypočítáme ze vztahu [1; str. 45]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{G_l \cdot l^4}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{12 \cdot 10^{10} \cdot 6,25 \cdot 10^{-10}}{2,69 \cdot 0,01^4}} = \mathbf{84,03 \text{ Hz}} \quad (4.2.6.2-2)$$

,kde  $E$  - modul pružnosti vodiče ( $E_{Cu} = 12 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ )

$J$  – moment setrvačnosti průřezu vodiče k ose kolmé na směr kmitání, tedy v mém případě

$$J = \frac{b^3 \cdot h}{12} = \frac{0,005^3 \cdot 0,060}{12} = 6,25 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

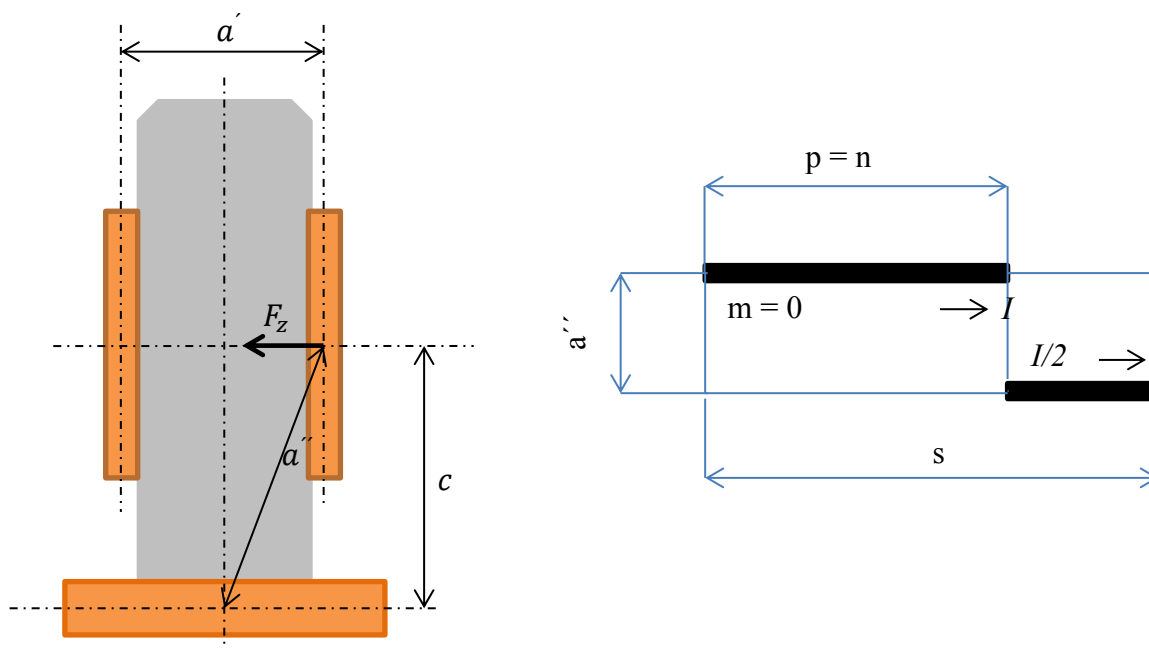
$G_l$  – je tíha vodiče na 1 m délky  $\rightarrow G_l = \rho_{Cu} \cdot l \cdot b \cdot h = 8960 \cdot 1 \cdot 0,005 \cdot 0,060 = 2,69 \text{ kg}$

$l$  – je délka vodiče mezi rozpěrkami  $\rightarrow l = 0,1 \text{ m}$

Vlastní kmitočet se tedy nerovná udané nepřijatelné podmínce, ani se neblíží jejím násobkům, Mohu tedy určenou délku rozteče bezpečnostních rozpěrek považovat za vyhovující.

#### 4.2.6.3 Přitažlivá síla mezi praporcem a rovnoběžným nožem odpojovače

Uspořádání jednotlivých na sebe působících úseků a jednotlivé vzdálenosti jsou znázorněny na zjednodušeném Obr – 4.2.6.3-1.



**Obr. 4.2.6.3-1** zjednodušené uspořádání působících sil praporec-rovno. nože

Odhadnu délku přívodu na  $n = 1 \text{ m}$ , délka zároveň vyhovuje podmínkám oteplovací zkoušky, a osová vzdálenost nožů od sebe je  $a' = 3,6 \text{ cm}$ . Síla  $F_z$  nepůsobí kolmo, ale pod úhlem, který svírá osa nože odpojovače a osa přírodního pasu. Další vzdálenost, kterou potřebuji znát k určení této síly pomocí následujícího vztahu je vzdálenost  $s = 110 \text{ cm}$  (délka nože mezi bezpečnostní rozpěrkou a dotykovým místem zvětšená o odhadnutou délku přívodu).



Při znalosti  $c = 4,25 \text{ cm}$ , je [1; str. 103]:

$$a'' = \sqrt{\left(\frac{a'}{2}\right)^2 + c^2} = \sqrt{\left(\frac{3,6}{2}\right)^2 + 4,25^2} = \mathbf{4,62 \text{ cm}} \quad (4.2.6.3-1)$$

Potom, při  $p = n$  je:

$$F'_z = 10^{-7} \cdot \frac{I_D^2}{2} \left[ 1 - \sqrt{\left(\frac{s-p}{a'}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{-n}{a''}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{s}{a''}\right)^2 + 1} \right] =$$

$$10^{-7} \cdot \frac{25000^2}{2} \left[ 1 - \sqrt{\left(\frac{110-100}{4,62}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{-100}{4,62}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{110}{4,62}\right)^2 + 1} \right] = \mathbf{24,31 \text{ N}} \quad (4.2.6.3-2)$$

Protože je přírodní úsek několikanásobně větší než uvažovaná délka nože, můžu předpokládat, že působí síla  $F_z$  je přibližně uprostřed délky nože  $l$ . Velikost této síly na obou krajních podporách, z nichž jedna podpora je místo styku, je pak poloviční. Navíc síla nepůsobí kolmo, ale svírá se směrem působícího kontaktního přitlaku úhel  $\alpha$ , a pro velikost síly v místě styku je tedy [1; str. 103]:

$$F_z = \frac{F'_z \cdot \cos \alpha}{2} = \frac{F'_z \cdot a'}{4 \cdot a''} = \frac{24,31 \cdot 3,6}{4 \cdot 4,62} = \mathbf{4,74 \text{ N}} \quad (4.2.6.3-3)$$

#### 4.2.6.4 Výsledná elektrodynamická síla

Výsledná elektrodynamická síla ovlivňuje každý styk ve směru přitlaku na kontakt. Velikost výsledné elektrodynamické síly a charakter jednotlivých sil ve směru přitlaku na kontakt jsou patrné ze vztahu (3.2.5.4-1), tedy přitažlivá síla působící mezi rovnoběžnými noži  $F_{II}$ , přitažlivá síla mezi praporem a rovnoběžným nožem odpojovače  $F_z$  a výsledná odpudivá síla proudových úžin  $F_u$ , a tedy [1; str. 104]:

$$F_V = 0,5 F_{II} + F_z - F_u = 0,5 \cdot 61 + 4,74 - 9 = \mathbf{26,25 \text{ N}} \quad (4.2.6.4-1)$$

#### 4.2.6.5 Potřebná velikost přitlačné síly $F_k$ vyvolaná pomocí přitlačné pružiny

V předchozích výpočtech jsem vypočítal velikost přechodového odporu na kontaktech a jejich minimální velikost přitlačné síly na kontakt z hlediska nebezpečí svaření, nebo měknutí daných kontaktů. K určení potřebné přitlačné síly  $F_k$  i s ohledem na výslednou velikost elektrodynamických sil si vyberu sílu  $F_{k2} = \mathbf{241,12 \text{ N}}$ . Tato velikost síly představuje minimální velikost přitlačné síly při průchodu zkratového proudu z hlediska nebezpečí svaření kontaktů. Jako minimální potřebnou sílu jsem si ji vybral proto, že je jednoduše vyšší než velikost potřebné přitlačné síly z hlediska nebezpečí měknutí kontaktů.

Přitlačnou sílu, kterou vyvolá přitlačná pružina  $F_{pruž}$  musím odhadnout, a to tak, aby výsledná velikost  $F_k$  i s ohledem na výslednou velikost dynamických sil byla vyšší než minimální potřebná síla  $F_{k2}$ , a tedy [1; str. 104]:

$$F_{pruž} > F_{k2} - F_V = 241,12 - 26,24 \cong \mathbf{215 \text{ N}} \quad (4.2.6.5-1)$$

Velikost 215 N představuje opravdu krajní velikost přitlačné síly. Pro zajištění bezpečné minimální síly na kontakt z hlediska elektrodynamických sil a z hlediska velikosti přechodového odporu na kontaktu, zvednu velikost minimální síly přitlačné pružiny na  $F_{pruž} = 300 \text{ N}$ . Velikost přitlačné síly  $F_k$  je pak [1; str. 104]:

$$F_k = F_{pruž} + F_V = 300 + 26,24 \cong \mathbf{326 \text{ N}} \quad (4.2.6.5-2)$$

Velikost  $F_k = 326 \text{ N}$  představuje velikost přitlačné síly na kontakt, která je o 35% větší než minimální potřebná síla při průchodu zkratového proudu  $I_D$  kontaktem. Je tedy splněna podmínka  $F_k > F_{k2}$ , a síla se zdá být dostatečná. Ve výsledku jsem ale zjistil, že není. Při kontrole krátkodobého oteplení při

zvolené přitlačné síle 300 N jsem zjistil, že kontakty průchodem zkratového proudu by se svařily, proto přitlačnou sílu zvednu až na  $F_{pruž} = 600 \text{ N}$ .

#### 4.2.6.6 Síla záhybu proudové dráhy působící na rovnoběžné nože

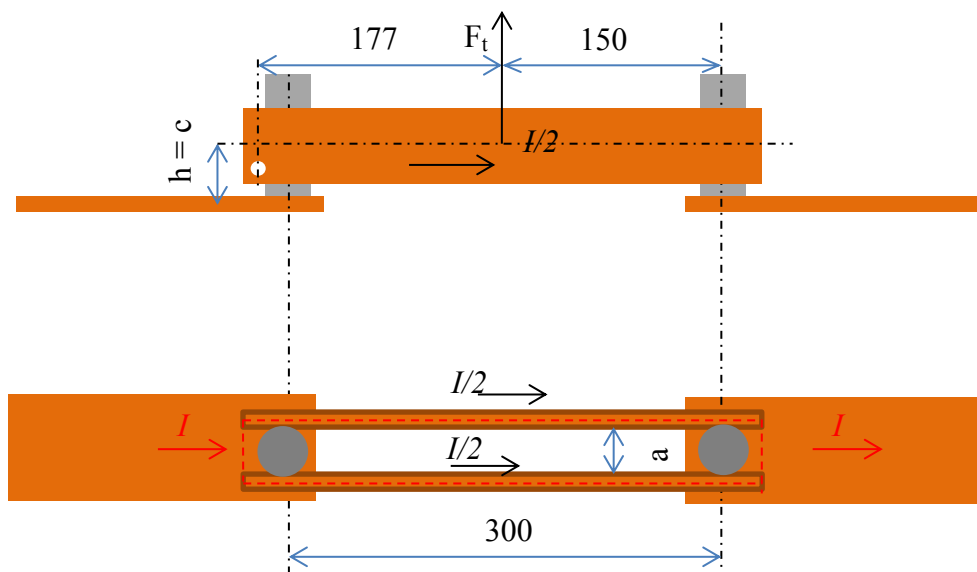
Poslední silou, s kterou musím při návrhu počítat, je síla, která působí pro vypnutí odpojovače ze zapnuté polohy. Velikost působící síly  $F_t$ , počítaná podle vztahu 4.2.5.6-1 se díky tomu, že nepočítám s délkou přívodních vodičů, nepatrně liší od skutečné velikosti působící síly. Rozdíl poklesu intenzity magnetického pole, který vyvolají přívody v paralelních nožích, nacházející se mimo osu proudové dráhy je proti intenzitě pole v ose minimální. Tento rozdíl můžu zanedbat, a velikost působící síly je tedy použitím vztahu větší než skutečná působící síla. Tato skutečnost z hlediska návrhu a zajištění bezpečnosti nevadí, naopak je vždy výhodnější.

Velikost síly působící na oba mechanicky spojené nože je pak [1; str. 106]:

$$F_t = 2.2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{I_D^2}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{2l}{a} - 1\right) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2 + h}}{\sqrt{l^2 + h^2 + h}} =$$

$$4 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{25000^2}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 30}{3,1} - 1\right) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{3,1}{2}\right)^2 + 4,25^2 + 4,25}}{\sqrt{30^2 + 4,25^2 + 4,25}} = 92,4 \text{ N} \quad (4.2.6.6-1)$$

Potřebné vzdálenosti, a působící síla jsou znázorněna na zjednodušeném obr. 4.2.6.6-1.



Obr. 4.2.6.6-1 vzdálenosti a působící síla záhybu

Hodnota představuje velikost síly, která se snaží svým působením provést nežádoucí vypnutí. Proto musíme nože odpojovače v zapnuté poloze blokovat a to tak, aby se síla, respektive její moment se nemohl projevit. Velikost této síly vyvolá vypínací momentový ráz o velikosti [1; str. 106]:

$$M = F_t \cdot l_m = 92,4 \cdot 0,177 = 16,35 \text{ Nm} \quad (4.2.6.6-2)$$

### 4.3 Oteplení proudové dráhy

#### 4.3.1 Měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení

Proudovodná dráha odpojovače je vyrobena z mědi (elektrovodná měď o čistotě 99,9%), a roubík má navíc povrchovou úpravu postříbřením (vrstva v řádu jednotek  $\mu m$ ). Toto postříbření je provedeno hlavně kvůli mechanickým vlastnostem (nízká tvrdost stříbra proti cizím vrstvám tvořících se na mědi). Z důvodu opravdu tenké vrstvy postříbření mohou provést zjednodušení a zanedbám vliv příměsí i vliv pokovení.

Budu předpokládat oteplení proudovodné dráhy odpojovače  $\Theta = 45\text{ K}$ . Měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení je:

$$\rho_{Cu} = \rho_{Cu40}(1 + \alpha\theta) = 1,92 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0036 \cdot 45) = \mathbf{2,23 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m} \quad (4.3.1-1)$$

, kde podle [1; str. 118] je:

Měrný odpor mědi -  $\rho_{Cu40} = 1,92 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , teplotní součinitel mědi  $\alpha = 0,0036\text{ K}^{-1}$

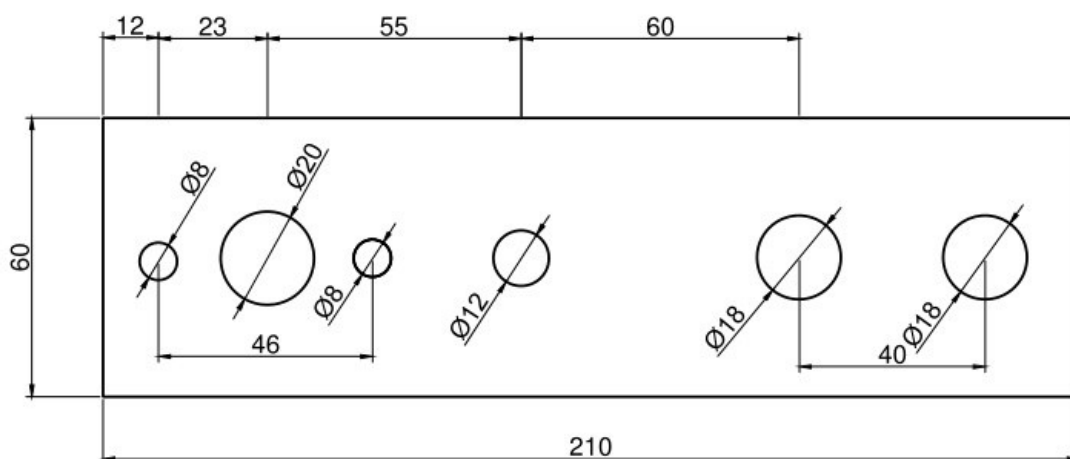
#### 4.3.2 Horní přípojovací pás

##### 4.3.2.1 Určení činitele zvýšení elektrického odporu $k$ při snížení průřezu praporce

Ke zvýšení celkového elektrického odporu plného pasu v činné délce proudovodné dráhy  $l = 135\text{ mm}$  dochází v místech, kde se snižuje jeho průřez. Podle obr-4.3.2-1, je v mém případě takových zúžených míst celkem tři. Činitele zvýšení odporu pro plochý vodič s kruhovým otvorem odečtu z grafu [1; str. 32; Graf 2-6]. Jednotlivé činitele ukazuje tab. 4.3.2-1.

**Tab. 4.3.2-1** činitele zvýšení elektrického odporu horního pasu

	1	2	3
$\varnothing$ díry	18	12	8
$b$	60	60	60
$a = b - \varnothing$	42	48	52
$a/b$	0,7	0,8	0,87
$k_n$	1,35	1,2	1,16



**obr-4.3.2.1-1** Přípojovací pás odpojovače

#### 4.3.2.2 Činitel skinefektu $k_s$

Abych mohl odečíst z grafu hodnotu činitele skinu, musím nejprve určit poměr mezi výškou a šířkou praporce:

$$\frac{b}{h} = \frac{60}{10} = 6 \quad (4.3.2.2-1)$$

Dále průřez pas:

$$S_{hP} = 0,06 \cdot 0,01 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.3.2.2-2)$$

a hodnotu:

$$\sqrt{\frac{S_{hP} \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,23 \cdot 10^{-8}}} \cong 1160 \quad (4.3.2.2-3)$$

kde  $f = 50 \text{ Hz}$  je kmitočet, a  $\rho_{Cu} = 2,23 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  je měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení  $45 \text{ K}$ .

Z výše uvedených hodnot tedy odečtu z grafu hodnotu činitele skinu [1; str. 30; Graf 2-4]:

$$k_s = 1,07 \quad (4.3.2.2-4)$$

#### 4.3.2.3 Elektrický odpor horního připojovacího pasu

Z rozměrů připojovacího pasu (obr. 3.3.2-1) určím činnou délku  $l_{hP}$  proudovodné dráhy (od osy pevného kontaktu do středu mezi oba připojovací otvory):

$$l_{hP} = 135 \text{ mm} \quad (4.3.2.3-1)$$

Elektrický odpor horního pasu tak bude [1; str. 119]:

$$R_{hP} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{hP}} \cdot [l_{hP} + b \cdot (k_1 + k_2 + k_3 - 3)] \cdot k_s = \frac{2,23 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10^{-4}} \cdot [0,135 + 0,06(1,35 + 1,2 + 1,16 - 3)] \cdot 1,07 = 7,07 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4.3.2.3-2)$$

#### 4.3.2.4 Náhradní chladivost povrchu horního pasu

##### 1) Měrná chladivost zářením $\alpha_{zhP}$

Chladicí povrch pasu je kromě spojovací plochy barevně natřen, aby se zvýšilo chlazení zářením, jeho emisivita je  $E_z \cong 0,8$  [1; str. 120]. Činitel stínění okolím odhadnu na  $k_{zhP} = 0,8$  [1; str. 107]. Základní vzorec odečteme z tabulky [1; str. 53; Tab. 2-44]:

$$\alpha_z = (5,6 + 0,034 \cdot \Theta) \quad (4.3.2.4-1)$$

Pro předpokládané oteplení  $\Theta = 45 \text{ K}$  je měrná chladivost zářením horního praporce:

$$\alpha_{zhP} = k_{zhP}(5,6 + 0,034 \cdot \Theta) = 0,8(5,6 + 0,034 \cdot 45) \cong 5,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.2.4-2)$$

##### 2) Měrná chladivost prouděním $\alpha_{khP}$

Svislé plochy pasu jsou součástí proudovodné dráhy v celku s přírady delší než 0,3 m. Pro měrnou chladivost prouděním [1; str. 53; Tab. 2-44]:

$$\alpha_{khP} = 0,9(3 + 0,03 \cdot \Theta) = 0,9(3 + 0,03 \cdot 45) \cong 3,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.2.4-3)$$

Hodnota 0,9 ve vzorci znamená snížení střední velikosti udávající vzorec měrné chladivosti prouděním, a to z důvodu, abych přibližně vyjádřil změnu chladivosti s narůstající výškou proudovodné dráhy,

díky postupnému ohřívání okolního vzduchu [1; str. 107]. Proto, v případě horního pasu střední hodnotu měrné chladivosti zmenším o 10% a na druhou stranu, v případě dolního pasu měrnou chladivost zase zvýším o 10%.

**3) Celková náhradní chladivost  $\alpha_{0hP}$  horního praporce [1; str. 108]:**

$$\alpha_{0hP} = \alpha_{khP} + \alpha_{zhP} = 3,9 + 5,7 = 9,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.2.4-4)$$

#### 4.3.2.5 Velikost chladicí plochy horního pasu

K určení chladicích ploch praporce budu vycházet z délky aktivní proudovodné dráhy, respektive vyjádřím plochu kolem této délky. Nebudu považovat za chladicí plochu tu část plochy, kde je připevněn kloub. Dále zanedbám konce připojovacího pasu, které bych jinak musel zařadit do schématu jako chladicí tyče. Jako chladicí tyč ale do schématu později zařadím uchycení kloubu, a proto musím tu část plochy, která zakrývá odečíst od celkové velikosti plochy připojovacího pasu.

- Část plochy zakrývající kloub uchycení paralelních nožů

$$S_k = 0,03 \cdot 0,035 = 0,00105 \text{ m}^2 \quad (4.3.2.5-1)$$

Chladicí povrch má volnou jen délku  $0,135 - 0,045 = 0,9 \text{ m}$ . Úvahou, že vlivem matic, který slouží k připojení přípojnice k praporci a rozměrům přeskokového hrotu, se velikost chladicí plochy zvětší, tak abych zohlednil zvětšenou plochu, navýším výslednou velikost chladicí plochy o 10% [1; str. 120].

Chladicí povrch má volnou jen délku  $0,135 - 0,045 = 0,9 \text{ m}$

$$P_{hP} = 1,1 \cdot [2(0,06 + 0,01) \cdot 0,9] - (S_k) \cong 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (4.3.2.5-2)$$

#### 4.3.2.6 Výpočtová velikost chladicího obvodu horního pasu

Výpočtová velikost chladicího obvodu horního praporce, přiřazená průřezu  $S_{hP} = 0,06 \cdot 0,01 = 0,0006 \text{ m}^2$  na činné délce proudovodné dráhy  $l = 0,135 \text{ m}$  je [1; str. 120]:

$$O_{hP} = \frac{P_{hP}}{l_{hP}} = \frac{0,013}{0,135} = 0,096 \text{ m} \quad (4.3.2.6 -1)$$

#### 4.3.2.7 Veličiny náhradního $\pi$ – článku horního pasu [1; str. 120]

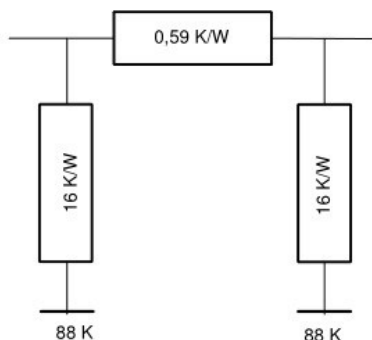
$$\beta l = l_{HP} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{0hP} \cdot O_{hP}}{\lambda_{Cu} \cdot S_{hP}}} = 0,135 \cdot \sqrt{\frac{9,6 \cdot 0,096}{385 \cdot 0,0006}} \cong 0,27 \quad (4.3.2.7 -1)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_{OHP} \cdot O_{PHP} \cdot \lambda_{Cu} S_{HP}} = \sqrt{9,6 \cdot 0,096 \cdot 385 \cdot 0,0006} = 0,461 \quad (4.3.2.7 -2)$$

$$R_{TlHP} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,27)}{0,461} = 0,591 \cong 0,59 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.2.7 -3)$$

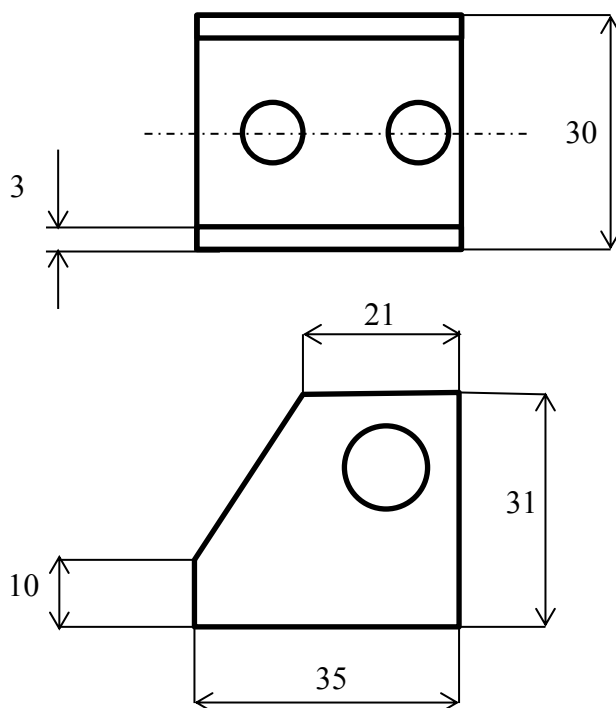
$$R_{TthP} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,461 \cdot \tanh\left(\frac{0,27}{2}\right)} \cong 16 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.2.7 -4)$$

$$\Theta_{\infty HP} = \frac{R_{hP} \cdot I_N^2}{\alpha_{0hP} \cdot P_{hP}} = \frac{7,07 \cdot 10^{-6} \cdot 1250^2}{9,6 \cdot 0,013} \cong 88 \text{ K} \quad (4.3.2.7 -5)$$

4.3.2.8 Náhradní  $\pi$ -článek horního pasuobr. 4.3.2.8-1 náhradní  $\pi$ -článek horního pasu

## 4.3.2.9 Zařazení kloubu do schématu horního praporce jako chladicí tyče [4]

Kloub k připevnění odpojovacích nožů je vyroben z oceli a do schématu ho zařadím jako krátkou chladicí tyč.



Obr. 4.3.2.9-1 Rozměry kloubu uchycení nožů

## 4.3.2.9.1 Rozdělení podélného odporu praporce [4; str.28].

Nejprve rozdělíme podélný odpor  $R_{TlhP} = 0,59 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$  na dvě části podle umístění kloubu vzhledem k proudovodné dráze.

Délka proudovodné dráhy od připojených vodičů po střed uchycení kloubu:

$$l_k = 95 \text{ mm} \quad (4.3.2.9.1-1)$$

Podélný odpor od přívodních vodičů po střed uchycení kloubu je [4; str.28]:

$$R_{Tlka} = R_{TlhP} \cdot \frac{l_k}{l_{hP}} = 0,59 \cdot \frac{95}{135} = \mathbf{0,42 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}} \quad (4.3.2.9.1-2)$$

Podélný odpor od středu uchycení kloubu po kontakt, tvořený pase a roubíkem [4; str.28]:

$$R_{Tlkb} = R_{TlhP} - R_{Tlka} = 0,59 - 0,42 = \mathbf{0,17 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}} \quad (4.3.2.9.1-3)$$

#### 4.3.2.9.2 Výpočet chladičí plochy kloubu[4; str.28]:

Uvažuji jednu spodní plochu, druhá je kryta praporcem:

$$S_1 = 0,035 \cdot 0,03 = \mathbf{0,00105 \text{ m}^2}$$

Dále dvě boční stěny, od nich odečtu dvě plochy, které jsou kryty ploškou nožů odpojovače 20 mm x 20 mm, a k tomu přičtu dvě vnitřní boční stěny (Otvory zanedbám):

$$S_{2boční} = 2 \cdot (0,021 \cdot 0,031) + 2 \cdot (0,014 \cdot 0,031 \cdot 0,5) = \mathbf{0,0017 \text{ m}^2}$$

$$S_{2vnitřní} = 2 \cdot (0,021 \cdot 0,025) + 2 \cdot (0,014 \cdot 0,025 \cdot 0,5) = \mathbf{0,0014 \text{ m}^2}$$

$$S_2 = S_{2boční} + S_{2vnitřní} - 2(0,02 \cdot 0,02) = \mathbf{0,0023 \text{ m}^2}$$

Poslední uvažovanou ploškou je šířka bočních stěn:

$$S_3 = 2(0,003 \cdot 0,082) = \mathbf{0,000492 \text{ m}^2}$$

Velikost chladičí plochy je tedy:

$$P_{ChK} = S_1 + S_2 + S_3 \cong \mathbf{0,0038 \text{ m}^2} \quad (4.3.2.9.2-1)$$

#### 4.3.2.9.3 Náhradní chladičivost oceli [4; str.29]:

##### 1) Měrná chladičivost zářením $\alpha_z$

Emisivitu určím [1; str. 49; Tabulka 2-38]-(mezi čistě opracovanou a oxidovanou ocelí)  $E_z = 0,4$ . Základní vzorec odečtu z tabulky[1; str. 49; Tabulka 2-38] pro předpokládané oteplení  $\Theta = 45 \text{ K}$ , je měrná chladičivost zářením kloubu, jestliže činitel stínění, opět odhadnu na  $k_z = 0,8$ :

$$\alpha_{zK} = 0,8(2,8 + 0,017 \cdot \Theta) = 0,8(2,8 + 0,017 \cdot 45) = \mathbf{2,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} \quad (4.3.2.9.3-1)$$

##### 2) Měrná chladičivost konvekcí $\alpha_k$

Měrná chladičivost prouděním[1; str. 53; Tab. 2-44] je stejná jako proudění u horního praporce s 10% odlišením střední hodnoty, kterou udává vzorec, proti měrné chladičivosti dolního praporce, je:

$$\alpha_{kK} = 0,9(3 + 0,03 \cdot \Theta) = 0,9(3 + 0,03 \cdot 45) \cong \mathbf{3,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} \quad (4.3.2.9.3-2)$$

##### 3) Celková náhradní chladičivost kloubu[4; str.28],

$$\alpha_{0K} = \alpha_{kK} + \alpha_{zK} = 3,9 + 2,85 \cong \mathbf{6,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} \quad (4.3.2.9.3-3)$$

#### 4.3.2.9.4 Přechodový tepelný odpor uchycení kloubu[4; str.29]

Součinitel přestupu tepla pro vzduch při  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  je podle tabulek:

$$\lambda_{20} = \mathbf{0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Protože předpokládám oteplení 45 K, určím součinitel přestupu tepla pro vzduch  $t = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Gradient změny součinitele přestupu tepla pro vzduch je  $0,0002\text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}/5\text{ K)}$ , tedy součinitel přestupu tepla při  $t = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$  je [4; str.29]

$$\lambda_{65} = \lambda_{20} + \frac{\Theta}{5} \cdot 0,0002 = 0,026 + \frac{45}{5} \cdot 0,0002 \cong 0,03\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (4.3.2.9.4-1)$$

Přechodový tepelný odpor přestupu tepla, jestliže plocha styku kloubu je  $P_s = 0,035 \cdot 0,030 = 0,00105\text{ m}^2$  a s odhadnutím vzduchové mezery, která je vlivem pevného šroubového spoje  $\delta = 10\text{ }\mu\text{m}$  je [4; str.29]

$$R_{stk} = \frac{\delta}{\lambda \cdot P_s} = \frac{0,00001}{0,03 \cdot 0,00105} \cong 0,32\text{ K}\cdot\text{W}^{-1} \quad (4.3.2.9.4-2)$$

#### 4.3.2.9.5 Tepelný odpor uchycení kloubu

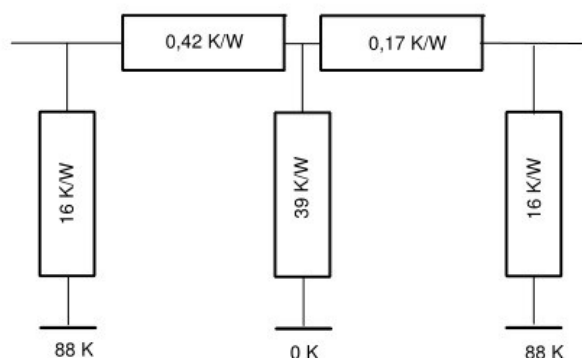
Uchycení kloubu bez uvážení přechodového odporu [4; str.29]:

$$R_{tCH} = \frac{1}{\alpha_{0K} \cdot P_{Chk}} = \frac{1}{6,8 \cdot 0,0038} \cong 38,7\text{ K}\cdot\text{W}^{-1} \quad (4.3.2.9.5-1)$$

Uchycení kloubu s uvážením přechodového odporu:

$$R_{tCHK} = R_{tCH} + R_{stk} = 38,7 + 0,32 \cong 39\text{ K}\cdot\text{W}^{-1} \quad (4.3.2.9.5-2)$$

#### 4.3.2.10 Kompletní tepelné schéma horního praporce



Obr. 4.3.2.10-1 Kompletní tepelné schéma horního praporce

#### 4.3.3 Dolní připojovací pás

Rozdíl mezi horním a dolním praporcem je ve velikosti měrné chladivosti prouděním, kterou uvažuji o 10% lepší než výpočtová střední hodnota [1; str.108], a ve velikosti chladicí plochy, kde nemuším uvažovat se zakrytím ocelovým kloubem.

##### 1) Měrná chladivost konvekcí $\alpha_k$ dolního praporce:

$$\alpha_{kdP} = 1,1(3 + 0,03 \cdot \Theta) = 1,1(3 + 0,03 \cdot 45) \cong 4,79\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (4.3.3-1)$$

##### 2) Celková náhradní chladivost $\alpha_0$ [1; str. 108]:

$$\alpha_{0dP} = \alpha_{kdP} + \alpha_{zhP} = 4,79 + 5,7 = 10,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (4.3.3-2)$$

##### 3) Velikost chladicí plochy dolního praporce

$$P_{hDP} = 1,3 \cdot 10^{-2} + 0,00105 = 1,4 \cdot 10^{-2}\text{ m}^2 \quad (4.3.3-3)$$



## 4) Velikost chladicího obvodu dolního praporce

$$O_{hP} = \frac{P_{hDP}}{l_{hP}} = \frac{0,014}{0,135} = 0,1037 \text{ m} \quad (4.3.3-4)$$

4.3.3.1 Veličiny náhradního  $\pi$  – článku dolního praporce [1; str.120]

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{odP} \cdot O_{hP}}{\lambda_{Cu} \cdot S_{hP}}} = 0,135 \cdot \sqrt{\frac{10,5 \cdot 0,1037}{385 \cdot 0,0006}} = 0,293 \quad (4.3.3.1-1)$$

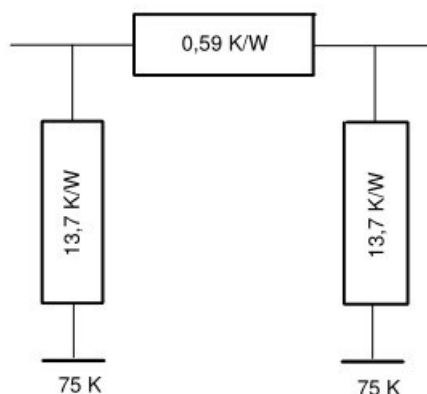
$$\delta = \sqrt{\alpha_{odP} \cdot O_{hP} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{hP}} = \sqrt{10,5 \cdot 0,1037 \cdot 385 \cdot 0,0006} = 0,501 \quad (4.3.3.1-2)$$

$$R_{TldP} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,293)}{0,501} \cong 0,59 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.3.1-3)$$

$$R_{TtDP} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,403 \cdot \tanh\left(\frac{0,293}{2}\right)} \cong 13,7 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.3.1-4)$$

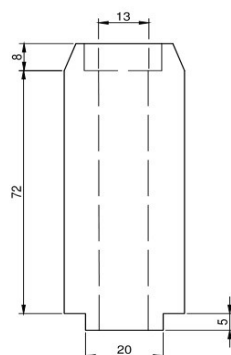
$$\Theta_{\infty} = \frac{R_{hP} \cdot I_N^2}{\alpha_{odP} \cdot P_{hDP}} = \frac{7,07 \cdot 10^{-6} \cdot 1250^2}{10,5 \cdot 0,014} \cong 75 \text{ K} \quad (4.3.3.1-5)$$

## 4.3.3.2 Náhradní tepelné schéma dolního praporce [1; str.120]

obr. 4.3.3.2-1 náhradní  $\pi$ -článek dolního praporce

## 4.3.4 Pevný kontakt

Pevný kontakt je tvořen roubíkem ve tvaru válce (obr. 4.3.4. -1).



Obr. 4.3.4 -1 Rozměry roubíku

## 4.3.4.1 Průřez roubíku [1; str.120]

$$S_R = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(0,031^2 - 0,013^2)}{4} = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (4.3.4.1-1)$$

**4.3.4.2 Činitel skinu roubíku**[1; str.28; graf 2-3]

Abych mohl odečíst z grafu hodnotu činitele skinu, musím nejprve určit daný poměr:

$$\frac{t}{D} = \frac{D-d}{2 \cdot D} = \frac{31-13}{2 \cdot 31} = \mathbf{0,29} \quad (4.3.4.2-1)$$

Pak hodnotu:

$$\sqrt{\frac{S_R \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{6,2 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,23 \cdot 10^{-8}}} \cong \mathbf{1081} \quad (4.3.4.2-2)$$

$$\text{Činitel skinu } k_s = \mathbf{1,03} \quad (4.3.4.2-3)$$

**4.3.4.3 Elektrický odpor roubíku**[1; str.120]

Průtokovou délku roubíku určím z obr. 3.3.4 - 1,  $l_R = 40 \text{ mm}$  a odpor roubíku je tedy:

$$R_R = \rho_{Cu} \frac{l}{S_k} \cdot k_s = 2,23 \cdot 10^{-8} \frac{0,04}{6,2 \cdot 10^{-4}} \cdot 1,03 = \mathbf{1,48 \cdot 10^{-6} \Omega} \quad (4.3.4.3-1)$$

**4.3.4.4 Uvážení povrchového jevu**[1; str.121]

Roubík má rozměry, kdy musíme uvažovat s povrchovým jevem. Roubík je připevněn k připojovacímu praporci a zároveň k izolační podpěře šroubem M12. V případě, že by jím protékal proud, uplatnil by se povrchový jev, a proud by protékal u povrchu šroubu ve slabé vrstvě určené hloubkou vniku.

**1) Hloubka vniku:**

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{Fe}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_{Fe}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15 \cdot 10^{-8}}{100 \pi \cdot 1000 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-8}}} = 0,00087 \cong \mathbf{1 \text{ mm}} \quad (4.3.4.4-1)$$

**2) Odpor vrstvy**

Šroub velikosti M12 má vnější průměr přibližně 11 mm, a při činné délce 72 mm je odpor vrstvy, kterou by protékal proud:

$$R_V = \rho_{Fe} \frac{l}{S_k} = 15 \cdot 10^{-8} \frac{4 \cdot l}{\pi(D^2 - d^2)} = \frac{4 \cdot 0,072}{\pi(0,011^2 - 0,009^2)} = \mathbf{3,44 \cdot 10^{-4} \Omega} \quad (4.3.4.4-2)$$

Vzhledem ke skinu je tento odpor o dva řády vyšší. Navíc díky odporu stykového místa může tak šroubem protékat nanejvýš proud o velikosti několika ampérů. Umístění šroubu v osové dutině navíc vyvolává ztráty vířivými proudy. Případné ztráty jsou tedy malé a můžeme je zanedbat.

**4.3.4.5 Chladivý povrch roubíku**

Velikost chladicího povrchu tvoří čelní kruhová plocha a pásy šířky 2 cm na horní a dolní straně roubíku:

$$P_{RCh} = \frac{\pi \cdot 0,031^2}{4} + 2 \cdot 0,08 \cdot 0,02 = \mathbf{3,95 \cdot 10^{-3} m^2} \quad (4.3.4.5-1)$$

**4.3.4.6 Náhradní chladivost roubíku****1) Měrná chladivost sáláním  $\alpha_{zR}$** 

Roubík je postříbřen, s kovově matným povrchem, emisivita  $E_{zAg} \cong 0,15$  a činitelem stínění  $k_{zR} = 0,8$ . Pro předpokládané oteplení  $\Theta = 45 \text{ K}$  je měrná chladivost zářením roubíku:

$$\alpha_{zR} = k_{zR}(1,1 + 0,006 \cdot \Theta) = 0,8(1,1 + 0,006 \cdot 45) \cong \mathbf{1,1 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \quad (4.3.4.6-1)$$

## 2) Měrná chladivost prouděním $\alpha_{kR}$

Pro měrnou chladivost prouděním [1; str. 53; Tab. 2-44] respektuji stejné podmínky jako u praporků, jen opět vyjádřím změnu chladivost s narůstající proudovodnou drahou, díky postupnému ohřívání vzduchu, tedy hodnotu měrné chladivosti horního roubíku zmenším o 10% a v případě dolního roubíku měrnou chladivost zase zvýším o 10%.

### • Horní roubík

$$\alpha_{khR} = 0,9(3 + 0,03 \cdot \Theta) = 0,9(3 + 0,03 \cdot 45) \cong 3,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.4.6-2)$$

### • Dolní roubík

$$\alpha_{kdR} = 1,1(3 + 0,03 \cdot \Theta) = 1,1(3 + 0,03 \cdot 45) \cong 4,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.4.6-3)$$

## 3) Celková náhradní chladivost $\alpha_{0R}$ roubíku [1; str. 121]:

### • Horní roubík

$$\alpha_{0hR} = \alpha_{khR} + \alpha_{zR} = 3,9 + 1,1 = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.4.6-4)$$

### • Dolní roubík

$$\alpha_{0dR} = \alpha_{kdR} + \alpha_{zR} = 4,79 + 1,1 = 5,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.4.6-5)$$

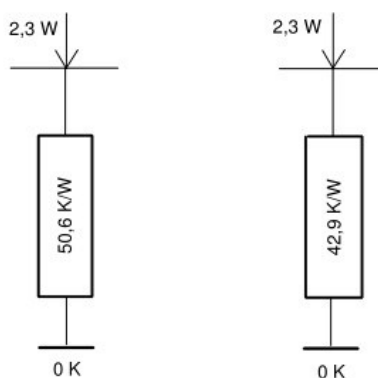
### 4.3.4.7 Náhradní schéma roubíku [1; str. 121]

Díky nerovnoměrnému proudovému zatížení roubíku, nemůžu jeho průřez považovat za konstantní a do tepelného schématu ho zařadím jako chladicí odpor s vtokem  $Q_{ChR}$ :

$$Q_{ChR} = R_R \cdot I_N^2 = 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot 1250^2 \cong 2,3 \text{ W} \quad (4.3.4.7-1)$$

$$R_{tChhR} = \frac{1}{\alpha_{0hR} \cdot P_{RCh}} = \frac{1}{5,0,00395} \cong 50,6 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.4.7-2)$$

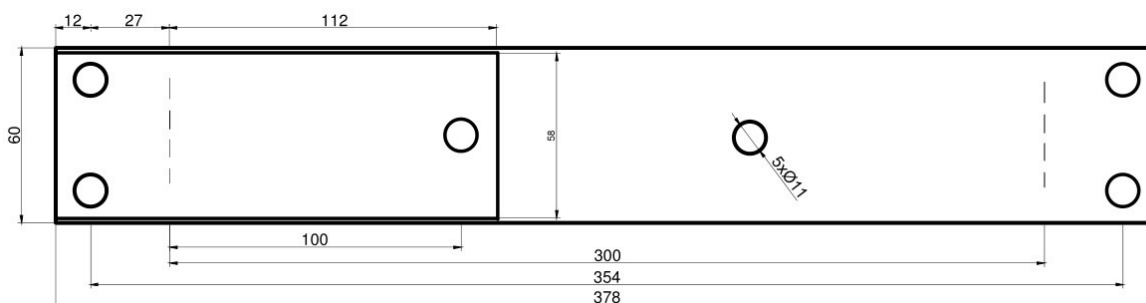
$$R_{tChdR} = \frac{1}{\alpha_{0dR} \cdot P_{RCh}} = \frac{1}{5,9,0,00395} \cong 42,9 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.4.7-3)$$



Obr. 4.3.4.7-1 – náhradní schéma horního a dolního roubíku

### 4.3.5 Odpojovací nůž

#### 4.3.5.1 Určení činitele zvýšení elektrického odporu $k$ při snížení průřez odpojovacího nože



Obr. 4.3.5.1-1 Rozměry odpojovacího nože

K zúžení průřezu je patrné z obr. 4.3.5.1-1 dochází jen v případě děr pro čepy.

- zúžení průřezu o díru o průměru 11 mm [4; str.33]

Obě díry pro čepy jsou stejné velikosti, a proto budou mít stejný koeficient zhuštění,

$$a = b - \phi = 60 - 11 = 49 \text{ mm} \quad (4.3.5.1-1)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{49}{60} = 0,82 \quad (4.3.5.1-2)$$

Činitel zvýšení odporu pro plochý vodič s kruhovým otvorem určím odečtením z grafu [1; str. 32; Graf 2-6] -  $k_{1,2} = 1,2$  (4.3.5.1-3)

#### 4.3.5.2 Činitel skinefektu $k_s$ [4; str.33]

Abych mohl odečíst z grafu hodnotu činitele skinu, musím nejprve určit poměr mezi výškou a šířkou praporce:

$$\frac{b}{h} = \frac{60}{5} = 12 \quad (4.3.5.2-1)$$

Dále průřez nože:

$$S_{on} = 0,06.0,005 = 3.10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.3.5.2-2)$$

a hodnotu:

$$\sqrt{\frac{S_N \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{3.10^{-4} \cdot 50}{2,23.10^{-8}}} \cong 820 \quad (4.3.5.2-3)$$

kde  $f = 50 \text{ Hz}$  je kmitočet, a  $\rho_{Cu} = 2,23.10^{-8} \Omega \cdot m$  je měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení  $45 \text{ K}$ .

Z výše uvedených hodnot tedy odečtu z grafu hodnotu činitele skinu [1; str. 30; Graf 2-4]:

$$K_s = 1,04 \quad (4.3.5.2-4)$$

#### 4.3.5.3 Elektrický odpor odpojovacího nože [4; str.33]

Z rozměrů odpojovacího nože (obr. 4.3.5.1-1) určím aktivní délku  $l$  proudovodné dráhy.

$$l_{on} = 300 \text{ mm} \quad (4.3.5.3-1)$$

Elektrický odpor odpojovacího nože tak bude [1; str.122]:

$$R_{on} = \frac{\rho_{cu}}{S} \cdot [l + 2 \cdot b \cdot (2 \cdot k_{1,2} - 1)] \cdot k_s = \frac{2,23 \cdot 10^{-8}}{0,06 \cdot 0,005} \cdot [0,300 + 2 \cdot 0,06(2 \cdot 1,2 - 2)] \cdot 1,04 =$$

$$= 2,69 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (4.3.5.3-2)$$

#### 4.3.5.4 Náhradní chladiivost povrchu odpojovacího nože [4; str.33]

##### 1) Měrná chladiivost zářením $\alpha_z$

Činitel stínění okolím odhadnu na 10%, tedy  $k_{z1} = 0,9$ . Činitel vzájemného stínění vnitřních stěn nože  $k_{z2}$  vypočtu podle vztahu [1; str.122], kde  $h$  ve vztahu představuje výšku nože a  $a$  představuje vzdálenost nožů od sebe.

$$k_{z2} = \frac{h+a-\sqrt{h^2+a^2}}{h} = \frac{6+3,1-\sqrt{6^2+3,1^2}}{6} = 0,4 \quad (4.3.5.4-1)$$

Celkový koeficient stínění vnitřních stěn nože [1; str.122]:

$$k_n = k_{z1} \cdot k_{z2} = 0,9 \cdot 0,4 = 0,36 \quad (4.3.5.4-2)$$

Dále určím povrch jedné z vnitřních ploch odpojovacího nože. Uvažuju plochu aktivní proudovodné dráhy zakrytou válečky. Váleček o průměru 14 mm zakrývá plochu o velikosti [4; str.34]:

$$P_{sv} = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} = 1,54 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (4.3.5.4-3)$$

Velikost chladicí plochy vnitřní strany s odečtem dvou ploch zakrytých válečky [4; str.34]:

$$P_{n1} = l_n \cdot h - 2 \cdot P_{sv} = 0,300 \cdot 0,06 - 2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4} = 0,0177 m^2 \quad (4.3.5.4-4)$$

Velikost chladicí vnější plochy bez plochy zakrytých jednou kovovou příložkou a podložkou o průměru  $d_p = 20 mm$  obr 3.3.4-1 [4; str.34].

$$P_{n2} = 0,300 \cdot (0,06 + 2 \cdot 0,005) - \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} - 0,112 \cdot 0,058 =$$

$$= 0,014 m^2 \quad (4.3.5.4-5)$$

Výslední činitel stínění celého povrchu nože [4; str.34]:

$$k_{zn} = \frac{k_n \cdot P_{n1} + k_{z1} \cdot P_{n2}}{P_{n1} + P_{n2}} = \frac{0,36 \cdot 0,0177 + 0,9 \cdot 0,014}{0,0177 + 0,014} \cong 0,6 \quad (4.3.5.4-6)$$

Materiál, z něhož je nůž odpojovače vyroben, je stejný jako materiál praporce. Povrch je s ohledem na dobré chlazení zářením barevně natřen, kromě stykových ploch, které jsou chráněny proti korozi slabou tukovou vrstvou. To znamená opět emisivita  $E_z \cong 0,8$ , a pro předpokládané oteplení  $\Theta = 45 K$  je tedy měrná chladiivost zářením nože odpojovače:

$$\alpha_{zon} = k_{zn}(5,6 + 0,034 \cdot \Theta) = 0,6(5,6 + 0,034 \cdot 45) \cong 4,3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (4.3.5.4-7)$$

##### 2) Měrná chladiivost konvekcí $\alpha_k$ :

$$\alpha_{kon} = (3 + 0,03 \cdot \Theta) = (3 + 0,03 \cdot 45) \cong 4,35 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (4.3.5.4-8)$$

##### 3) Celková náhradní chladiivost $\alpha_{0N}$ [4; str. 34]:

$$\alpha_{on} = \alpha_{kon} + \alpha_{zon} = 4,35 + 4,3 = 8,65 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (4.3.5.4-9)$$

#### 4.3.5.5 Výpočtová velikost chladicího obvodu nože

Aktivní délka proudovodné dráhy  $l_{on} = 0,3 \text{ m}$  [4; str.34] a velikost ztrátového chladicího obvodu je pak:

$$O_{on} = \frac{P_{n1} + P_{n2}}{l} = \frac{0,0177 + 0,014}{0,3} \cong \mathbf{0,1057 \text{ m}} \quad (4.3.5.5-1)$$

#### 4.3.5.6 Veličiny náhradního $\pi$ – článku pro dva paralelně nože [4; str.34]

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot 2 \cdot O_{on}}{\lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S_{on}}} = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{8,65 \cdot 2 \cdot 0,1057}{385 \cdot 2 \cdot 0,0003}} \cong \mathbf{0,844} \quad (4.3.5.6-1)$$

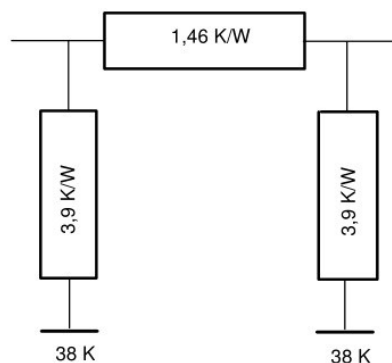
$$\delta = \sqrt{\alpha_{on} \cdot 2 \cdot O_{pn} \cdot \lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S_{on}} = \sqrt{8,65 \cdot 2 \cdot 0,1057 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 0,0003} \cong \mathbf{0,65} \quad (4.3.5.6-2)$$

$$R_{Tlon} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,844)}{0,65} \cong \mathbf{1,46 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}} \quad (4.3.5.6-3)$$

$$R_{Tton} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,65 \cdot \tanh\left(\frac{0,844}{2}\right)} \cong \mathbf{3,9 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}} \quad (4.3.5.6-4)$$

$$\Theta_{\infty} = \frac{R_{on} \cdot I_N^2}{\alpha_{on} \cdot 4 \cdot (P_{n1} + P_{n2})} = \frac{2,69 \cdot 10^{-5} \cdot 1250^2}{8,14 \cdot (0,0177 + 0,014)} \cong \mathbf{38 \text{ K}} \quad (4.3.5.6-5)$$

#### 4.3.5.7 Náhradní $\pi$ -článek odpojovacího nože



obr. 4.3.5.7-1 náhradní  $\pi$ -článek odpojovacího nože

#### 4.3.5.8 Zařazení konce nožů do schématu jako chladících tyčí [4; str.35]

Jedná se o část nože mimo aktivní proudovodnou dráhu, a tyto konce působí jako chladící tyče.

##### 1) Měděné části chladící plochy [4; str.35]

Budu počítat se stejným činitelem stínění vnitřních a vnějších ploch konců nože, jako u zbytku nože, tedy:

- činitel stínění vnějších ploch  $k_{z1} = \mathbf{0,9}$
- činitel stínění vnitřních ploch  $k_n = \mathbf{0,36}$

Od vnitřní plochy konců nože musím odečíst plochu, kterou zakrývají stínící válečky. Při celkové délce konce nože, s uvažováním přesahu za stykem s praporcem, tedy  $l = 39 \text{ cm}$  je pak velikost vnitřní plochy konce nože [4; str.35]

$$P_{Ch01} = (0,039 \cdot 0,06 - 2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4}) = \mathbf{0,00203 \text{ m}^2} \quad (4.3.5.8-1)$$

Protože jsou nože dva:

$$P_{Ch1} = 2 \cdot P_{Ch01} = \mathbf{0,00406 \, m^2} \quad (4.3.5.8-2)$$

Při určování vnějšího povrchu plochy konce nože, musím uvažovat se zastíněním plochy u horního konce ocelovou příložkou, dolní je bez zakrytí [4; str. 35].

$$\begin{aligned} P_{Ch2H} &= 2 \cdot ((0,06 \cdot 0,039) + (2,0 \cdot 0,039 \cdot 0,005) + (0,005 \cdot 0,06) - (0,039 \cdot 0,058)) = \\ &= \mathbf{0,00154 \, m^2} \end{aligned} \quad (4.3.5.8-3)$$

$$\begin{aligned} P_{Ch2D} &= 2 \cdot ((0,06 \cdot 0,039) + (2,0 \cdot 0,039 \cdot 0,005) + (0,005 \cdot 0,06)) = \\ &= \mathbf{0,0061 \, m^2} \end{aligned} \quad (4.3.5.8-4)$$

- **Pro činitel stínění** [4; str. 35]:

$$k_{ChzsH} = \frac{k_n \cdot P_{Ch1} + k_{z1} \cdot P_{Ch2H}}{P_{Ch1} + P_{Ch2H}} = \frac{0,36 \cdot 0,00406 + 0,9 \cdot 0,00154}{0,00406 + 0,00154} = \mathbf{0,51} \quad (4.3.5.8-5)$$

$$k_{ChzsD} = \frac{k_n \cdot P_{Ch1} + k_{z1} \cdot P_{Ch2D}}{P_{Ch1} + P_{Ch2D}} = \frac{0,36 \cdot 0,00406 + 0,9 \cdot 0,0061}{0,00406 + 0,0061} = \mathbf{0,68} \quad (4.3.5.8-6)$$

- **chladihost zářením  $\alpha_z$**  měděných částí [4; str. 34], použiju stejný vzorec jako u horního praporce, jen s jiným činitelem stínění

$$\begin{aligned} \alpha_{zkHn} &= k_{ChzsH} (5,6 + 0,034 \cdot \Theta) = 0,51 (5,6 + 0,034 \cdot 45) = \\ &\cong \mathbf{3,63 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \end{aligned} \quad (4.3.5.8-7)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{zkDn} &= k_{ChzsD} (5,6 + 0,034 \cdot \Theta) = 0,68 (5,6 + 0,034 \cdot 45) = \\ &\cong \mathbf{4,85 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \end{aligned} \quad (4.3.5.8-8)$$

- **chladihost prouděním  $\alpha_k$**  [4; str. 34]

Horní část má zase horší podmínky a tedy:

$$\alpha_{khkn} = 0,9 (3 + 0,03 \cdot \Theta) \cong \mathbf{3,9 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \quad (4.3.5.8-9)$$

Dolní zase lepší:

$$\alpha_{kdkn} = 1,1 (3 + 0,03 \cdot \Theta) \cong \mathbf{4,8 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \quad (4.3.5.8-10)$$

**celková náhradní chladihosti** [4; str. 34]

$$\alpha_{0hkn} = \alpha_{khkn} + \alpha_{zkHn} = 3,9 + 3,63 \cong \mathbf{7,5 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \quad (4.3.5.8-11)$$

$$\alpha_{0dkn} = \alpha_{kdkn} + \alpha_{zkDn} = 4,8 + 4,85 \cong \mathbf{9,65 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \quad (4.3.5.8-12)$$

## 2) Ocelové části chladící plochy [4; str.35]

Jedná se o ocelové rozpěrky. Plocha ocelové rozpěrky ve tvaru válečku. Plocha jednoho válečku je [4; str.35]:

$$P_{Chv1} = \pi \cdot d_v \cdot a = \pi \cdot 0,014 \cdot 0,031 = \mathbf{1,363 \cdot 10^{-3} m^2} \quad (4.3.5.8-13)$$

Pro dva válečky (obr. 4.3.5.1-1) je tedy plocha:

$$P_{Chv} = 2 \cdot P_{Chv1} = \mathbf{2,73 \cdot 10^{-3} m^2} \quad (4.3.5.8-14)$$

Válečky leží mezi rovnoběžnými noži, proto je činitel stínění stejný jako u vnitřních ploch odpovídajícího nože [4; str.35]:

$$k_n = \mathbf{0,36}$$

- chladiivost zářením  $\alpha_z$

Pro určení chladiivosti zářením vyjdu ze vzorce (4.3.2.8.3-1), při výpočtu chladiivosti oceli. Lišit se bude jen v činiteli stínění[4; str.36]:

$$\alpha_{zv} = k_n(2,8 + 0,017 \cdot \Theta) = 0,36(2,8 + 0,017 \cdot 45) = 1,28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.8-15)$$

- Měrná chladiivost konvekcí  $\alpha_k$

$$\alpha_{kv} = (3 + 0,03 \cdot \Theta) = (3 + 0,03 \cdot 45) \cong 4,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.8-16)$$

- Celková náhradní chladiivost [4; str.35],

$$\alpha_{0vhk} = \alpha_{kv} + \alpha_{zv} = 0,9 \cdot 4,35 + 1,28 \cong 5,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.8-17)$$

$$\alpha_{0vdk} = \alpha_{kv} + \alpha_{zv} = 1,1 \cdot 4,35 + 1,28 = 6,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.9-18)$$

### 3) Tepelný odpor konců nožů [4; str.37]:

Přechodový tepelný odpor mezi částí nože a chladicí částí není, jsou vlastní součásti, a když zanedbám přechodový tepelný odpor mezi válečkem a nožem, při předpokladu dostatečné velikosti přitlačné síly mohou pro tepelný odpor chladicí části psát[4; str.37]:

$$R_{thonCh} = \frac{1}{\alpha_{0hkn} \cdot (P_{Ch1} + P_{Ch2H}) + \alpha_{0vhk} \cdot P_{Chv}} = \frac{1}{7,5 \cdot (0,00406 + 0,0061) + 5,2 \cdot 0,00273} =$$

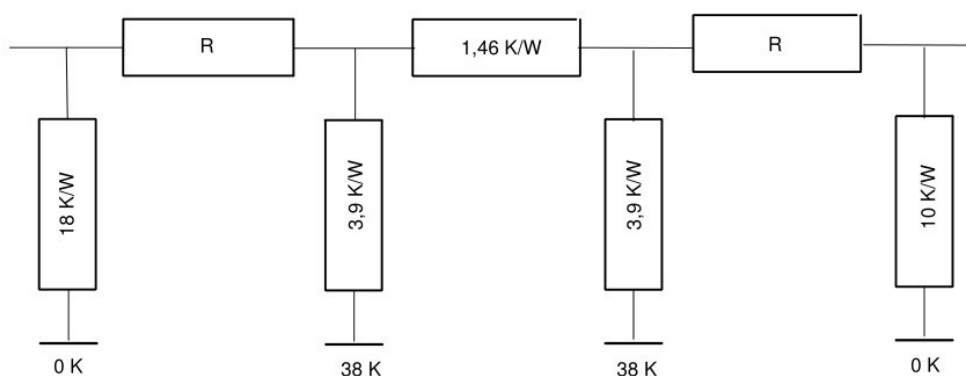
$$\cong 18 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.8-19)$$

$$R_{thonCh} = \frac{1}{\alpha_{0dkn} \cdot (P_{Ch1} + P_{Ch2D}) + \alpha_{0vdk} \cdot P_{Chv}} = \frac{1}{8,3 \cdot (0,00406 + 0,00154) + 6,1 \cdot 0,00273} =$$

$$\cong 10 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.8-20)$$

Tyto chladicí odpory jsou přiřazeny k hlavní proudové dráze až za činnými kontakty, jak ostatně bude vidět z následujícího obrázku (obr. 4.3.5.9-1)

#### 4.3.5.9 Náhradní $\pi$ -článek s konci nože



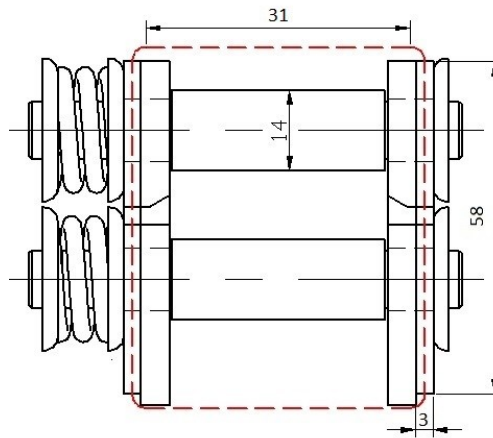
Obr. 4.3.5.9-1 Odpojovací nůž s konci nože jako s chladicími tyčemi

#### 4.3.5.10 Zařazení ocelových příložek do schématu odpojovacího nože [1; str.124]

Vřívivé proudy v ocelové příložce jsou dalším zdrojem ztrát. Obecný vztah velikost elektromagnetické síly je  $F_m = N \cdot I$ . Protože nůž představuje pouze jeden závit, je tedy  $F_m = \sum I = 1250 \text{ A}$ .



Intenzita magnetického pole  $H$ , procházející příložkou, je přibližně určena délkou siločáry, naznačená na obrázku 4.3.5.10-1.



Obr. 4.3.5.10-1 délka siločáry

- Délka siločáry je [4; str.37]:

$$l_h = 2 \cdot (0,031 + 0,058) + 2 \cdot \pi \cdot 0,0025 = \mathbf{0,1937 \text{ m}} \quad (4.3.5.10-1)$$

- Intenzita pole při magnetomotorické síle  $F_m = 1250 \text{ A}$  je [4; str.37]:

$$H = \frac{F_m}{l_h} = \frac{1250}{0,2197} = \mathbf{6453 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}} \quad (4.3.5.10-2)$$

Z magnetizační křivky pro ocel (přibližně totožná s křivkou pro ocelolitinu) odečteme z grafu indukci  $B_{Fe} = 1,7 \text{ T}$  [1; str. 124; Graf 4-29]. Aby byly sníženy ztráty v příložce, je v ní vyfrézovaná drážka, a její vliv vzhledem k její velice úzkému provedení zanedbám.

- Délka železných příložek [4; str.38]:

$$l_{Fe1} = \mathbf{0,151 \text{ m}} \quad (4.3.5.10-3)$$

- Ztráty v jedné příložce [4; str.39], kdy uvažujeme délku železných příložek k krajním čepům  $l_{Fe} = \mathbf{0,112 \text{ m}}$ , protože mimo proudovodnou dráhu se pole zeslabuje a není teda potřeba s uvažováním až k hraně ocelové příložky [1; str.III]

$$Q_1 = \frac{(\pi \cdot f \cdot B_{Fe})^2 \cdot (l_{Fe} \cdot b_{Fe})^3 \cdot h_{Fe}}{8 \cdot \rho_{Fe} (l_{Fe}^2 + b_{Fe}^2)} = \frac{(\pi \cdot 50 \cdot 1,7)^2 \cdot (0,112 \cdot 0,003)^3 \cdot 0,058}{8 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot (0,112^2 + 0,003^2)} \cong$$

$$\cong \mathbf{10 \text{ W}} \quad (4.3.5.10-4)$$

, kde  $h_{Fe}$  je výška příložky,  $b_{Fe}$  je šířka příložky,  $\rho_{Fe} = 0,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

- Chladiivost příložek**

Činitel stínění je stejný jako u vnějších ploch odpojovacího nože, tedy  $k_{z1} = \mathbf{0,9}$ .

#### 1) Chladiivost zářením [4; str.39]

Povrch příložky barevně natřen  $\epsilon_z = 0,8$ , stínění stejné jako pro vnější plochy měděného nože  $k_{z1} = 0,9$ :

$$\alpha_{zFe} = k_{z1} (5,6 + 0,034 \cdot 45) = 0,9 (5,6 + 0,034 \cdot 45) \cong \mathbf{6,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} \quad (4.3.5.10-5)$$

#### 2) Chladiivost prouděním [4; str.39]

Pro měrnou chladivost prouděním [1; str. 53; Tab. 2-44] :

$$\alpha_{kFe} = (3 + 0,03 \cdot \Theta) = (3 + 0,03 \cdot 45) \cong 4,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.10-6)$$

**3) Celková náhradní chladivost** [4; str.28],

$$\alpha_{0Fe} = \alpha_{kFe} + \alpha_{zFe} = 4,35 + 6,4 \cong 10,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.5.10-7)$$

- Povrch příložky** [4; str.39]

Zanedbám vliv drážky. Plochu příložky po výpočtu ještě zvětším o 5% (nárůst plochy o podložky a boky čepů):

$$P_{Fe} = 1,05[(0,151(0,058 + 2,0,003))] \cong 0,0101 \text{ m}^2 \quad (4.3.5.10-8)$$

- Průřez obou příložek** [4; str.39]

$$S_{Fe} = 2 \cdot h_{Fe} \cdot b_{Fe} = 2 \cdot 0,058 \cdot 0,003 = 3,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.3.5.10-9)$$

- Výpočtová velikost chladícího obvodu příložky** [4; str.39]

$$O_{Fe} = \frac{2 \cdot P_{Fe}}{l_{Fe1}} = \frac{2 \cdot 0,0101}{0,151} = 0,1338 \text{ m} \quad (4.3.5.10-10)$$

- Veličiny náhradního  $\pi$  - článku pro dvě ocelové příložky**

Předpokládám, že ztráty jsou rozloženy rovnoměrně na celou délku 0,151 m

$$\beta l = l_{Fe} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{0Fe} \cdot O_{Fe}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe}}} = 0,151 \cdot \sqrt{\frac{10,8 \cdot 0,1338}{40,3 \cdot 3,48 \cdot 10^{-4}}} = 1,538 \quad (4.3.5.10-11)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_{0Fe} \cdot O_{Fe} \cdot \lambda_{Fe} \cdot S_{Fe}} = \sqrt{10,8 \cdot 0,1338 \cdot 40,3 \cdot 3,48 \cdot 10^{-4}} = 0,142 \quad (4.3.5.10-12)$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(1,538)}{0,142} = 15,7 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.10-13)$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,142 \cdot \tanh\left(\frac{1,538}{2}\right)} \cong 11 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.10-14)$$

$$\Theta_{\infty} = \frac{2 \cdot Q_1}{\alpha_{Fe} \cdot 2 \cdot P_{Fe}} = \frac{2 \cdot 11}{10,8 \cdot 2 \cdot 0,0101} \cong 92 \text{ K} \quad (4.3.5.10-15)$$

Teplu vznikající v ocelové příložce se z části předává do okolí a z části přestupuje do měděného nože. Předpokladem je, že přestup se děje přes vzduchovou mezeru. Součinitel přestupu tepla pro vzduch o teplotě 65°C je  $\lambda_{65} = 0,0278 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Velikost vzduchové mezery vzhledem ke kontaktní síle a nerovnostem při dosedání na  $\delta = 0,0001 \text{ m}$ .

- Velikost stykové plochy jedné příložky** [4; str.40]

$$P_S = l_{Fe} \cdot h_{Fe} = 0,151 \cdot 0,058 = 0,00876 \text{ m}^2 \quad (4.3.5.10-16)$$

- Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru** [4; str.40]

$$R_{TFe} = \frac{\delta}{2 \cdot \lambda \cdot P_S} = \frac{0,0001}{2 \cdot 0,0278 \cdot 0,00876} \cong 0,205 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.10-17)$$

Odpor přestupu tepla rozdělíme na dva paralelní odpory pro dva uzly  $\pi$ - článku ocelové příložky:

$$R_{TFe1} = 2 \cdot R_{TFe} = 2 \cdot 0,205 = 0,41 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.10-18)$$

Schéma rozdělení odporu na dva paralelní odpory pro dva uzly  $\pi$ - článku ocelové příložky je zobrazeno na obr 3.3.4 – 4. Abychom mohli příložku propojit se schématem obr 3.3.4 – 3 odpojovacího nože, musíme podélný tepelný odpor  $R_{Tl} = 1,42 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$  rozdělit na dva úseky úměrné délkám nože krytými ocelovými příložkami a úseku příložkami nekrytého, tedy v poměru příložek  $l_{Fe} : l_{Cu}$ .

- Délka volné části nože** (obr. 3.3.4-1)

$$l_{Cu} = 0,378 - 0,151 = 0,227 \text{ m} \quad (4.3.5.10-19)$$

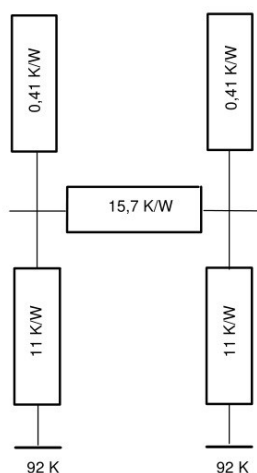
- Velikosti odporů po rozdělení  $R_{Tl}$  v poměru [4; str.40]

0,151:0,227

$$R_{Tl1} = l_{Fe} \cdot \frac{R_{tl}}{l_{Fe} + l_{Cu} + l_{Fe}} = 0,151 \cdot \frac{1,46}{0,151 + 0,227} = 0,58 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

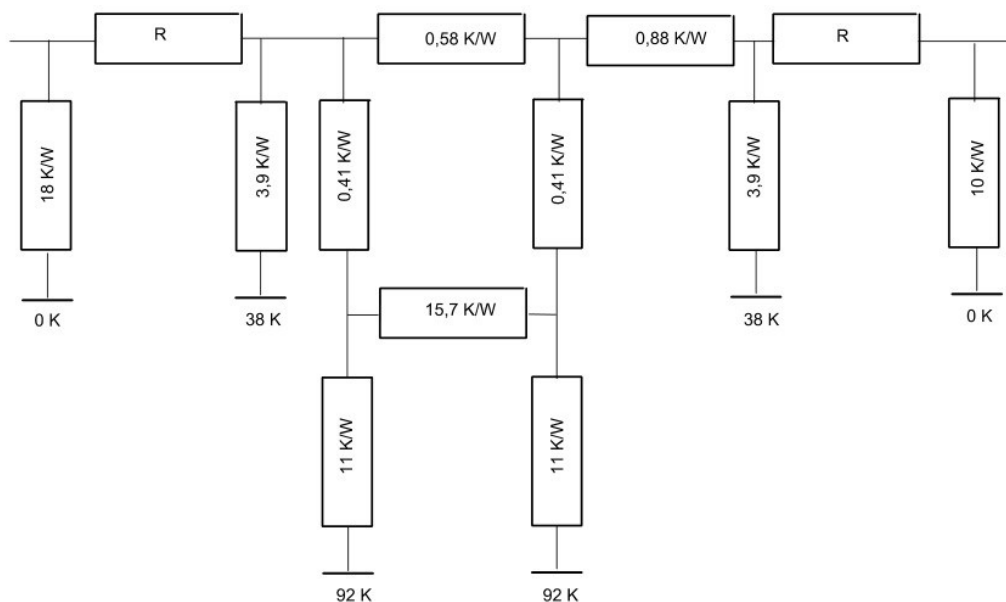
$$R_{Tl2} = R_{Tl} - R_{Tl1} = 1,46 - 0,58 = 0,88 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.5.10-20,21)$$

#### 4.3.5.11 Náhradní $\pi$ -článek ocelový příločky s rozdělením odporu na dva paralelní odpory



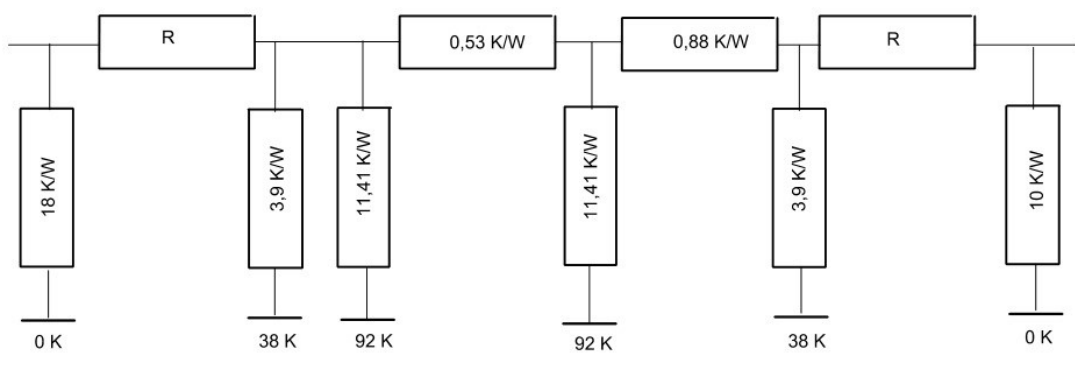
Obr. 4.3.5.11-1 dva paralelní odpory pro dva uzly

#### 4.3.5.12 Schéma odpojovacího nůž s ocelovými příložkami



Obr. 4.3.5.12-1 odpojovací nůž s ocelovými příložkami

Tímto ovšem vzniklo mřížkové schéma, které se řeší metodou  $n$ -rovníc o  $n$ -neznámých. Abych si ulehčil, vytvořím schéma jednořadové tak, že provedu transfiguraci. Podle [1; str.113] je chybou, kterou se transfigurací dopustím taková, že se oteplení uzlu může zmenšit řádově o desetinu stupně, a to můžu zanedbat.



obr. 4.3.5.12-2 jednořadové schéma odpojovacího nože s ocelovými příložkami

#### 4.3.6 Pracovní kontakt – pružinový styk

Na koncích spínacího nože tvoří úsek proudovodné dráhy dvě paralelně spojená dotyková místa s přitlačnou silou  $F_k = 600 \text{ N}$ .

##### 4.3.6.1 Elektrický odpor jednoho dotykového místa ( $n = 0,7$ - hodnota pro přímkový styk):

$$R_{k1} = k_{cu} \cdot F_k^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot (600)^{-0,7} = 9,1 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4.3.6.1-1)$$

##### 4.3.6.2 Tepelný odpor dotykového místa

Koeficient  $c$  přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních plošek určíme z tabulky [1; str. 61; tab. 2-58]

$$c \cong 0,7$$

a pak tepelný odpor při předpokládaném oteplení  $\Theta = 45 \text{ K}$ ,

$$R_{Tk1} = \frac{c \cdot R_{k1}}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,7 \cdot 9,1 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot 2,23 \cdot 10^{-8}} = 0,74 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.6.2-1)$$

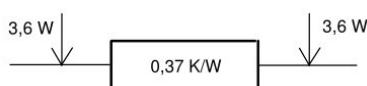
##### 4.3.6.3 Tepelný odpor dvou styků paralelně

$$R_{tk} = 0,5 R_{Tk1} = 0,37 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.6.3-1)$$

##### 4.3.6.4 Tepelné ztráty v jednom styku

$$Q_{k1} = R_{k1} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^2 = 9,1 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1250}{2}\right)^2 \cong 3,6 \text{ W} \quad (4.3.6.4-1)$$

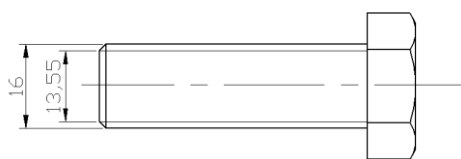
##### 4.3.6.5 Náhradní schéma činného styku



obr. 4.3.6.5-1 náhradní schéma činného styku

#### 4.3.7 Praporcový šroubový spoj – přívod, vývod

Přítlačná síla  $F_p$  je vyvinuta dvěma šrouby M 16 o průměru jádra  $d_j = 13,55 \text{ mm}$  (obr. 4.3.7-1).



obr. 3.3.7-1 Šroub M16

Při dovoleném namáhání materiálu  $\sigma_d = 30 \text{ MPa}$  vytváří oba šrouby tlak:

$$F'_{2p} = \frac{2\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \sigma_d = \frac{2\pi \cdot 0,01355^2}{4} \cdot 30 \cdot 10^6 \cong 8652 \text{ N} \quad (4.3.7-1)$$

#### 4.3.7.1 Skutečná přítláčná síla $F_p$ [1; str. 114]

Předpokladem je, že se tato síla při provozu zmenší na 30-50% z původní velikosti, a to vlivem otláčení, díky ohřívání a opětovnému chladnutí šroubů a praporce. Proto hodnotu skutečné přítláčné síly budu předpokládat zmenšenou s ohledem na tečení hliníkových přípojníc, tedy:

$$F_{2p} = 0,3 \cdot F'_{2p} = 0,3 \cdot 8652 \cong 2596 \text{ N} \quad (4.3.7.1-1)$$

#### 4.3.7.2 Elektrický odpor šroubového spoje (plošný styk $n = 1$ )

Uvažuji horší případ styku mezi mědí a měděnou přípojnící ( $k_{Cu-Cu} \cong 0,0008$ ):

$$R_S = k \cdot (F_{2p})^{-n} = 0,0008 \cdot (2596)^{-1} = 3,1 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (4.3.7.2-1)$$

#### 4.3.7.3 Tepelný odpor šroubového spoje

Koeficient  $c$  určíme z tabulky [1; str. 61; tab. 2-58],  $c = 0,5$ , předpokládané oteplení odpojovače je  $\Theta = 45 \text{ K}$ , při uvažování přípojnice s mědí, v případě přípojnice z hliníku musí být provedeno v místě připojení s praporcem našopování mědi:

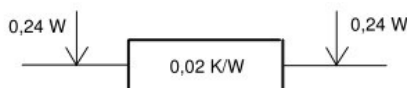
$$R_{TS} = \frac{c \cdot R_S}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,5 \cdot 3,1 \cdot 10^{-7}}{385,2 \cdot 23 \cdot 10^{-8}} = 0,02 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.7.3-1)$$

#### 4.3.7.4 Ztráty šroubového spoje

$$Q_S = R_S \cdot I^2 = 3,9 \cdot 10^{-7} \cdot 1250^2 \cong 0,48 \text{ W} \quad (4.3.7.4-1)$$

$$\frac{Q_S}{2} = \frac{12}{2} = 0,24 \text{ W} \quad (4.3.7.4-2)$$

#### 4.3.7.5 Náhradní schéma šroubového spoje



obr. 4.3.7.5-1 náhradní schéma šroubového spoje

#### 4.3.8 Šroubový spoj pevného kontaktu s praporcem [1; str. 128]

Přítláčnou sílu vyvolá šroub M12 průměrem jádra  $d_j = 9,7 \text{ mm}$ . Při dovoleném namáhání materiálu  $\sigma_d = 30 \text{ MPa}$  bude síla:

$$F'_p = \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 0,0097^2}{4} \cdot 30 \cdot 10^6 = 2217 \text{ N} \quad (4.3.8-1)$$

**4.3.8.1 Skutečná přitlačná síla  $F_p$  [1; str. 114]**

Předpokladem je, že se tato síla při provozu zmenší na 30-50% z původní velikosti, a to vlivem otlacení měděných ploch. Proto hodnotu skutečné přitlačné síly budu předpokládat zmenšenou s ohledem na styk tvořený materiály měď-měď, tedy:

$$F_p = 0,4 \cdot F'_p = 0,3 \cdot 2217 = 900 \text{ N} \quad (4.3.8.1-1)$$

**4.3.8.2 Elektrický odpor šroubového spoje (plošný styk  $n = 1$ )**

Uvažuji horší případ styku mezi postříbřeným a měděným povrchem ( $k_{CuAg} \cong 0,0007$ ) :

$$R_s = k \cdot (F_p)^{-n} = 0,0007 \cdot (900)^{-1} = 7,8 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (4.3.8.2-1)$$

**4.3.8.3 Tepelný odpor šroubového spoje**

Koeficient  $c$  určíme z tabulky [1; str. 61; tab. 2-58],  $c = 0,5$ , předpokládané oteplení odpojovače je  $\Theta = 45 \text{ K}$ , a pro měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení platí:

$$\rho_{Cu} = 2,23 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

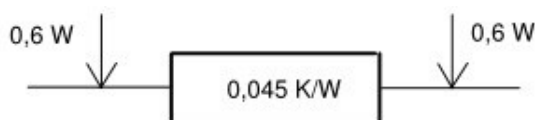
Tepelný odpor tedy [1; str. 114]:

$$R_{Ts} = \frac{c \cdot R_s}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,5 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7}}{385 \cdot 2,23 \cdot 10^{-8}} = 0,045 \text{ K} \cdot W^{-1} \quad (4.3.8.3-1)$$

**4.3.8.4 Ztráty šroubového spoje**

$$Q_s = R_s \cdot I^2 = 7,8 \cdot 10^{-7} \cdot 1250^2 = 1,22 \text{ W} \quad (4.3.8.4-1)$$

$$\frac{Q_s}{2} = \frac{1,22}{2} \cong 0,6 \text{ W} \quad (4.3.8.4-2)$$

**4.3.8.5 Náhradní schéma šroubového spoje roubík-praporec**

obr. 4.3.8.5-1 náhradní schéma šroubového spoje roubík-praporec

**4.3.9 Horní přípojnice [1; str. 128]**

V normě [2] se uvádí, že teplota přípojnice nesmí překročit teplotu  $t = 70^\circ\text{C}$ . To znamená, že při maximální teplotě okolí  $t = 40^\circ\text{C}$  nesmí přípojnice překročit oteplení 30 K. Proto u horní přípojnice předpokládám oteplení  $\Theta_p = 28 \text{ K}$ , a vhodný rozměr přípojnic s ohledem na předpokládané oteplení a velikost proudu  $I_N = 1250 \text{ A}$  jsou:

- Hliníkový přívodní pas - rozměr 100x10 mm ( $S_{Al} = 1000 \text{ mm}^2$ ;  $O_{VAl} = 0,220 \text{ m}$ )
- Měděný přívodní pas - rozměr 80x10 mm ( $S_{Cu} = 800 \text{ mm}^2$ ;  $O_{VCu} = 0,180 \text{ m}$ )

**1) Měrná chladivost záření  $\alpha_z$  [1; str. 52; Tabulka 2-44]**

Určit součinitel snížení chlazení zářením je vlivem okolní konstrukce prakticky nemožný, rozměry skříně, kobky, pohon. Podmínky instalace se mohou měnit, proto součinitel jen odhadnu na  $k_z = 0,9$ .

Povrch přípojníc bude barevně natřen, a tedy součinitel emisivity také odhadnu na 0,8.

$$\alpha_z = k_z(5,6 + 0,034\Theta_p) \quad (4.3.9-1)$$

## 2) Měrná chladivost konvekci $\alpha_k$

V horní části odpojovače je chladivost prouděním vzhledem k okolnímu vzduchu o 10% horší, než střední údaj udávanou tabulkou [1; str. 52; Tabulka 2-44]

$$\alpha_k = 0,9(3 + 0,03 \cdot \Theta_p) \quad (4.3.9-2)$$

## 3) Celková měrná chladivost $\alpha_{0H}$

Pro předpokládané oteplení horní přípojnice  $\Theta_p = 28 \text{ K}$  je:

$$\begin{aligned} \alpha_{0H} &= 0,9(\alpha_z) + 0,9(\alpha_k) = 0,9(5,6 + 0,034 \cdot 28) + 0,9(3 + 0,03 \cdot 28) = \\ &= 9,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (4.3.9-3)$$

### 4.3.9.1 Veličiny náhradního schématu horní přípojnice

Předpokladem je, že si přípojnici představím jako tepelně dlouhou tyč, kde k výměně tepla dochází mezi jejími konci. Proto příslušné veličiny náhradního schématu vypočtu jak pro hliník, tak zároveň pro měď, a do celkového tepelného schématu zahrnu horší případ.

$$\delta_{AlH} = \sqrt{\alpha_{0H} \cdot O_{VAl} \cdot \lambda_{Al} S_{Al}} = \sqrt{9,35 \cdot 0,220 \cdot 210 \cdot 0,001} = 0,657 \quad (4.3.9.1-1)$$

$$\delta_{CuH} = \sqrt{\alpha_{0H} \cdot O_{VCu} \cdot \lambda_{Cu} S_{Cu}} = \sqrt{9,35 \cdot 0,144 \cdot 385 \cdot 0,00072} = 0,72 \quad (4.3.9.1-2)$$

$$R_{tAlH} = \delta_{AlH}^{-1} = 1,52 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}; R_{tCuH} = \delta_{CuH}^{-1} = 1,39 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.9.1-3,4)$$

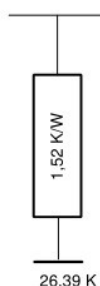
$$\rho_{Al} = \rho_{Al40}(1 + \alpha\theta) = 3,14 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0038 \cdot 28) = 3,47 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad (4.3.9.1-5)$$

$$\rho_{Cu} = \rho_{Cu40}(1 + \alpha\theta) = 1,92 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0038 \cdot 28) = 2,12 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad (4.3.9.1-6)$$

$$\Theta_{\infty AlH} = \frac{\rho_{Al} \cdot I^2}{\alpha_{0H} \cdot O_{VAl} \cdot S_{Al}} = \frac{3,47 \cdot 10^{-8} \cdot 1250^2}{9,35 \cdot 0,22 \cdot 0,001} = 26,39 \text{ K} \quad (4.3.9.1-7)$$

$$\Theta_{\infty CuH} = \frac{\rho_{Cu} \cdot I^2}{\alpha_{0H} \cdot O_{VCu} \cdot S_{Cu}} = \frac{2,12 \cdot 10^{-8} \cdot 1250^2}{9,35 \cdot 0,18 \cdot 0,0008} = 24,65 \text{ K} \quad (4.3.9.1-8)$$

### 4.3.9.2 Náhradní schéma horní přípojnice



obr. 4.3.8.2-1 náhradní schéma horní přípojnice

**4.3.10 Dolní přípojnice [1; str.128]**

Podmínky jsou stejné jak u horní přípojnice, rozdíl je v měrné chladivosti prouděním, která je o 10% lepší díky okolnímu vzduchu, jehož teplota není narušena. Pro předpokládané oteplení dolní přípojnice  $\Theta_p = 28\text{ K}$  je:

1) Měrná chladivost konvekci  $\alpha_k$  [1; str. 52; Tabulka 2-44]

$$\alpha_k = 1,1(3 + 0,03 \cdot \Theta_p) = 4,2\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.3.10-1)$$

2) Celková měrná chladivost  $\alpha_{0D}$

$$\begin{aligned} \alpha_{0D} &= 0,9(\alpha_z) + 0,9(\alpha_k) = 0,9(5,6 + 0,034 \cdot 28) + 1,1(3 + 0,03 \cdot 28) = \\ &= 10,12\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (4.3.10-2)$$

**4.3.10.1 Veličiny náhradního schématu dolní přípojnice**

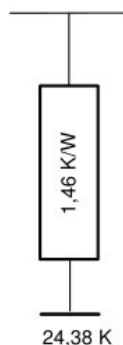
$$\delta_{AlH} = \sqrt{\alpha_{0D} \cdot O_{VAL} \cdot \lambda_{Al} S_{Al}} = \sqrt{10,12 \cdot 0,220 \cdot 210 \cdot 0,001} = 0,684 \quad (4.3.10.1-1)$$

$$\delta_{CuH} = \sqrt{\alpha_{0D} \cdot O_{VCu} \cdot \lambda_{Cu} S_{Cu}} = \sqrt{10,12 \cdot 0,144 \cdot 385 \cdot 0,00072} = 0,749 \quad (4.3.10.1-2)$$

$$R_{tAlH} = \delta_{AlH}^{-1} = 1,46\text{ K} \cdot \text{W}^{-1}; R_{tCuH} = \delta_{CuH}^{-1} = 1,34\text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.3.10.1-3,4)$$

$$\Theta_{\infty AlH} = \frac{\rho_{Al} \cdot I^2}{\alpha_{0H} \cdot O_{VAL} \cdot S_{Al}} = \frac{3,47 \cdot 10^{-8} \cdot 1250^2}{10,12 \cdot 0,22 \cdot 0,001} = 24,38\text{ K} \quad (4.3.10.1-5)$$

$$\Theta_{\infty CuH} = \frac{\rho_{Cu} \cdot I^2}{\alpha_{0H} \cdot O_{VCu} \cdot S_{Cu}} = \frac{2,12 \cdot 10^{-8} \cdot 1250^2}{10,12 \cdot 0,18 \cdot 0,0008} = 22,78\text{ K} \quad (4.3.10.1-6)$$

**4.3.10.2 Náhradní schéma dolní přípojnice**

obr. 4.3.9.2-1 náhradní schéma dolní přípojnice

**4.3.11 Kompletní tepelné schéma odpojovače [1; str.116]**

Jednotlivé vypočtené dílčí úseky jsem spojil do celkového tepelného schématu. Vyřešené schéma je na obrázku v souboru P1- Tepelné schéma odpojovače. Kontrolou zjišťuji, že tepelné schéma v celku odpovídá výpočtu při oteplení 45 K. Na kontaktech odpojovače, dojde k oteplení o 46,15 K v dolním styku, a o 49,88 v horním styku. Což představuje sice krajní, ale stále dovolené oteplení. Zde se jedná o kovovou část ve styku s izolanty třídy B, kde je jako izolant použit vzduch, a dovolené oteplení představuje hodnotu  $t = 90^\circ\text{C}$ . Odpojovač je konstruován pro normální prostředí, kde upozorňuji podle kapitoly 2.1.1 [2] je maximální teplota okolního vzduchu  $t = 40^\circ\text{C}$  a průměrnou  $t = 24^\circ\text{C}$ .



#### 4.4 Krátkodobé oteplení

Zatímco v předchozím výpočtu tepelného pole šlo o ustálené oteplení proudovodné dráhy při provozním oteplení, tedy o případ, kdy odpojovačem prochází jmenovitý proud, tak v případě výpočtu krátkodobého oteplení jde o případ, kdy odpojovačem prochází zkratový proud. V mém případě jde o zadanou podmínku  $I_{Th} = 25 \text{ kA}$ .

Nejmenší průřez proudovodné dráhy je v případě praporců v místě díry 12 mm pro připevnění přeskokového hrotu. Tedy průřez je:

$$S_p = 10(60 - 12) = \mathbf{480 \text{ mm}^2} \quad (4.4 -1)$$

Nejmenší průřez proudovodné dráhy v případě odpojovacího nože je v místě zúžení ocelové rozpěrky:

$$S_N = 5(60 - 11) = \mathbf{245 \text{ mm}^2} \quad (4.4 -2)$$

A v posledním případě určím nejmenší průřez roubíku:

$$S_R = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(0,031^2 - 0,013^2)}{4} = \mathbf{5 \cdot 10^{-4} \text{ m}} \quad (4.4 -3)$$

Z hlediska krátkodobého oteplení je tedy hledaný kritický průřez v místě odpojovacího nože. Podle tepelného schématu se oteplení nožů pohybuje v rozmezí 46 K až 49 K. S ohledem na bezpečnost výpočtu tak budu uvažovat s oteplením 47,5 K. Budu-li respektovat maximální teplotu okolí pro normální pracovní podmínky, tedy  $t_o = 40^\circ\text{C}$ , pak horní hranice teploty nožů je  $t_N = 40 + 47,5 = 87,5^\circ\text{C}$ . (maximální dovolené oteplení je  $t = 90^\circ\text{C}$  – kovová část ve styku s izolantem třídy B podle [1; str. 56; tab. 2-49].

Krajní dovolené krátkodobé oteplení měděného vodiče:

$$\Theta_k = 90 - 47,5 = 42,5^\circ\text{C} = 315,65 \text{ K} \quad (4.4 -4)$$

##### 4.4.1 Krátkodobé oteplení proudovodné dráhy v části nejmenšího průřezu

1) Měrný odpor mědi při oteplení 44 K

$$\rho_N = \rho_{Cu40}(1 + \alpha\theta) = 1,92 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0036 \cdot 42,5) \cong \mathbf{2,22 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m} \quad (4.4.1 -1)$$

2) Teplotní součinitel pro oteplení 44 K

$$\alpha_N = \alpha_{40} \cdot \frac{\rho_{40}}{\rho_N} = 0,0036 \cdot \frac{1,92}{2,22} = \mathbf{0,00311} \quad (4.4.1 -2)$$

3) Pomocná veličina K pro dvouvteřinový proud  $t_k = 2 \text{ s}$ :

$$K = \frac{\Theta_k}{t_k + \alpha_N \cdot t_k \cdot \Theta_k} = \frac{319,15}{2 + 0,00311 \cdot 2 \cdot 319,15} = \mathbf{80,1} \quad (4.4.1 -3)$$

4) Krajní dvouvteřinový proud  $I_{k2}$

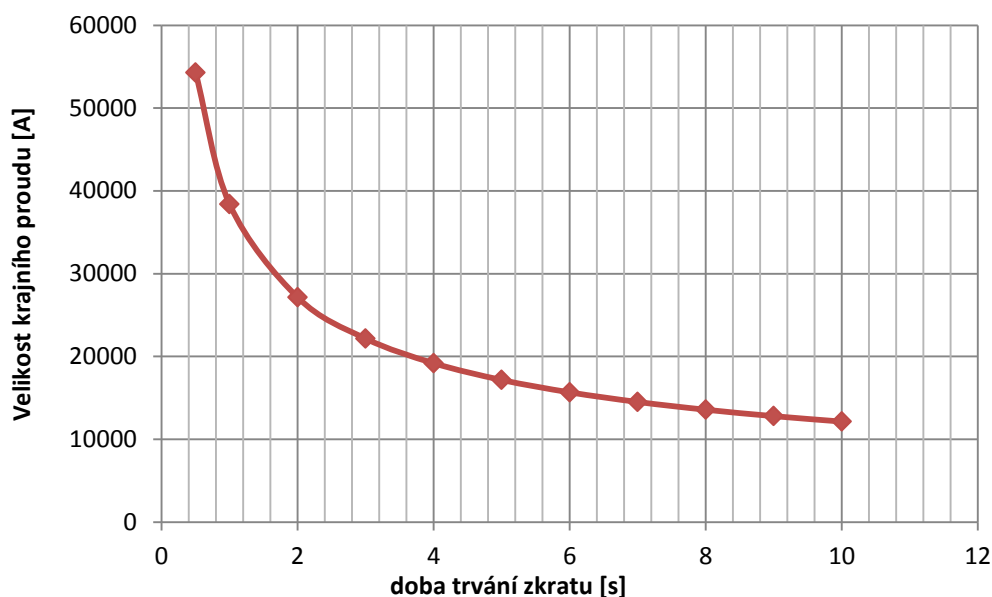
$$I_{k2} = S_N \cdot \sqrt{\frac{K \cdot c_{Cu}}{\rho_N}} = 245 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{80,1 \cdot 3,4 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 10^{-8}}} = \mathbf{27134 \text{ A}} \quad (4.4.1 -4)$$

Kde  $c_{Cu}$  je měrné teplo

Konstrukce odpojovače by z hlediska krátkodobého oteplení proudovodné dráhy, jestliže zadaná podmínka  $I_{Th} = 25 \text{ kA}$  odolala po dobu trvání zkratu 2 s.

Hodnoty krajních proudů pro další doby trvání zkratu vyjadřuje jejich závislost (Obr. 4.4.2-1).

#### 4.4.2 Zkratová charakteristika odpojovače



obr. 4.4.2-1 zkratová charakteristika odpojovače

#### 4.4.3 Krátkodobé oteplení na kontaktech

Abych ověřil kompletně odolnost odpojovače při průchodu zkratového proudu  $I_{Th} = 25 \text{ kA}$ , musím ještě ověřit, že nedojde ke svaření kontaktů. U kontaktu se jedná o přímkový styk a vzhledem k charakteru elektrodynamické síly působící na kontakt (kladná velikost- tzn. zvětšuje kontaktní přitlak), tak by teoreticky nemělo dojít ke svaření kontaktu při žádném nadproudu. Pro ověření, že úbytek napětí na styku  $U_k$  nedosáhne hodnoty napětí svaření, provedu výpočet nejen pro proud  $I_{Th} = 25 \text{ kA}$ , ale i pro několik dalších nadproudů podle [1; str. 132]

$$U_k = \frac{N \cdot k \cdot I_{Th}}{\left[ F_{pruž} + F_V \cdot \left( \frac{I_{Th}}{I_{Thn}} \right)^2 \right]^n} \quad (4.4.3 - 1)$$

Kde  $N = 2$  – počet paralelních drah;  $k = 8 \cdot 10^{-4}$  – činitel druhu materiálu,  $F_{pruž} = 600 \text{ N}$  – přitlačná síla pružin,  $F_V = 26,3 \text{ N}$  – výsledná elektrodynamická síla působící na kontaktní styk,  $I_{Th}$  – velikost zkratového proudu,  $I_{Thn} = \frac{I_{Th}}{2}$  – proud jedním kontaktem,  $n = 0,7$  – charakteristická hodnota přímkového styku.

Pro velikost  $I_{th} = 25000 \text{ A}$  je úbytek napětí na kontaktu  $U_{th} = 0,406 \text{ V}$ . Ke svaření kontaktů by došlo při překročení hodnoty  $U_{th} = 0,43 \text{ V}$ , proto můžu říct, že kontakty odolají z hlediska jejich svaření průchodem zkratového proudu o velikosti  $25000 \text{ A}$ .

Tab. 4.4.3 – 1 úbytky napětí při daném proudu

$I_k[\text{kA}]$	15	20	25	30	35	40
$F_v[\text{N}]$	9,46	16,8	26,3	37,8	51,5	67,3
$U_k[\text{V}]$	0.261	0.337	0.406	0.466	0.517	0.56

Z tabulky plyne, aby se kontakty svařily, byl by potřeba zkratový proud o velikosti  $I_{th} \sim 30000 \text{ A}$ , na který ale není můj odpojovač už dimenzován.

#### 4.5 Návrh kontaktní pružiny

Pružina slouží k tomu, aby zvýšila kvalitu styku, tedy snížila svým působením přechodový odpor. Na obou koncích paralelního nože je dvojice válcových tlačných pružin, které mají vyvinout přítlak s ohledem na svaření kontaktů o velikosti 600 N. Jedna pružina tak musí vyvinout přítlačnou sílu o velikosti  $P_9 = 300 \text{ N}$ .

Nejprve určíme poměr  $A$  středního průměru pružiny ve stavu volném  $D_s$  k průměru drátu pružiny  $d$ . [1; str. 133].

$$A = \frac{D_s}{d} \quad (4.5-1)$$

Protože nelze předem určit ukazatele pro nejvhodnější pružinu, zvolíme poměr v několika variantách a k vypočtenému poměru určíme hodnoty podle Wahlova součinitele:

$$\varphi = \frac{A-0,25}{A-1} + \frac{0,615}{A} \quad (4.5-2)$$

Dále pak vypočítám průměr drátu pružiny:

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot P_9 \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot \tau_D}} \quad (4.5-3)$$

Pro předpokládaný průměr drátu 2,5-3 mm stanovím dovolené namáhání ve smyku  $\tau_D = 0,4 \cdot \sigma_{pt}$  respektováním meze pevnosti podle [1; str. 70, tab 3-1].

$$\sigma_{pt} = 1900 \text{ MPa} \quad (4.5-4)$$

$$\tau_D' = 0,4 \cdot \sigma_{pt} = 0,4 \cdot 1900 = 760 \text{ MPa} \quad (4.5-5)$$

kde 0,4 je koeficient bezpečnosti.

Tabulka 4.5-1 ukazuje varianty výpočtů pomocí výše uvedených vztahů.

**Tab. 4.5-1** - Varianty výpočtů průřezu pružiny

A	$\varphi$	d
4	1,404	2,36
5	1,3105	2,57
6	1,2525	2,74
7	1,2129	2,92
8	1,1840	3,09

Protože pružina by měla být volně nasunuta na čepu průměru 10,6 mm, tomu nejlépe odpovídá varianta vyznačená v tabulce 3.5-1. Hodnotě průřezu 2,74 podle [1; str. 70, tab 3-1] nejbližší vyšší hodnota  $d = 2,8$ .

Velikost středního průměru pružiny je tedy:

$$D_s = A \cdot d = 6,2,8 = 16,8 \text{ mm} \quad (4.5-6)$$

a vnitřní průměr pružiny  $d_2$ :

$$d_2 = D_s - d = 16,8 - 2,8 = 14 \text{ mm} \quad (4.5-7)$$

Aby bylo vedení pružiny na čepu přesnější, ponechám průřez drátu na hodnotě  $d = 2,8$ , ale zmenším střední průměr pružiny na  $D_s = 14 \text{ mm}$ , a pak bude  $d_2 = 14 - 2,8 = 11,2 \text{ mm}$ . Tento rozměr musím ovšem překontrolovat pro dovolené namáhání  $\tau_D$ :

$$A = \frac{D_s}{d} = \frac{14}{2,8} = 5 \quad (4.5-8)$$

$$\varphi = \frac{A-0,25}{A-1} + \frac{0,615}{A} = 1,3105 \quad (4.5-9)$$

$$\tau_D = \frac{8.F_p.A.\varphi}{\pi.d^2} = \frac{8.300.5.1,3105}{\pi.2,8^2} = \mathbf{638,48 \text{ MPa}} \quad (4.5-10)$$

Namáhání vyhovuje pevnostní podmínce  $\tau_D' > \tau_D$ .

Nyní určíme počet  $n$  závitů pružiny a její délku při stlačeném a klidovém stavu. Vyjdu ze stačení jednoho závitu pružiny  $f_9$ , tj.  $Y_9$  pro  $n = 1$  [1; str. 134].

$$f_9 = \frac{8.n.D_s^3.P_9}{G.d^4} = \frac{8.1.0,014^3.300}{8,2.10^{10}.0,0028^2} = 0,00131 \text{ m} \cong 1,4 \text{ mm} \quad (4.5-11)$$

Kde  $G$  značí modu pružnosti ve smyku pro ocel [1; str. 134].

Pružinu provedu se čtyřmi činnými závity,  $n = 4$  a k tomu dva závěrné závity. To znamená, že pružina bude mít celkem  $z = 4 + 2 = 6$  závitů. Při práci závity nesmějí dosednout na sebe. Skutečnou dosedovou délku proto zvětším, i s ohledem na případnou nerovnost drátu, oproti teoretické (volí se mezi 15%-30%), volím  $k = 1,2$  a stlačená délka pružiny  $L_9$  [1; str. 134] je pak:

$$L_9 = k.z.d = 1,4.6.2,8 \cong \mathbf{23,5 \text{ mm}} \quad (4.5-12)$$

Délka pružiny ve stavu volném  $L_0$ :

$$L_0 = L_9 + n.f_9 = 23,5 + 4.1,4 \cong \mathbf{29 \text{ mm}} \quad (4.5-13)$$

Ještě zbývá určit jednotlivé stoupání jednotlivých závitů pružiny  $s$  [1; str. 134]

$$s = \frac{L_0 - n_z.d}{n} = \frac{29 - 2.2,8}{6} = \mathbf{3,9 \text{ mm}} \quad (4.5-14)$$

Nyní překontroluji sílu, jakou vyvine pružina v předpruženém stavu. Je-li délka při stlačení jednoho závitu  $f_9 = 1,3 \text{ mm}$  pak velikost síly, kterou vyvine pružina v předpruženém stavu  $P_1$  je [1; str. 135]

$$P_1 = \frac{G.d^4.f_9}{8.D_s^3} = \frac{8,2.10^{10}.0,0028^4.0,014}{8.0,014^3} = \mathbf{321 \text{ N}} \quad (4.5-15)$$

Pružina se tedy musí stlačit pomocí šroubu na konci vodícího čepu na délku  $L_9$ , při této délce vyvine pružina sílu  $321 \text{ N}$ . Na každý kontaktní styk nože odpojovače a roubíku budou instalovány dvě pružiny na obou koncích odpojovacího nože.

#### 4.6 Návrh momentu pro pohon

Výpočtem určíme minimální potřebný ovládací moment na hřídeli trojpólového odpojovače, a to pro upevnění odpojovače na svislé stěně.

Rozeznáváme dva stavy odpojovače, stav zapnuto a stav vypnuto. Při vypínání, kdy dochází k oddalování kontaktů odpojovače, tak v první fázi pohybu, kdy dochází k vysouvání nožů z pevného kontaktu, se překonávají jen třecí síly v horním a v dolním styku. Moment tíhy nožů, je v prvním okamžiku nulový, nebo velmi malý. Jak se nože odpojovače oddalují dále, dochází k vysunutí z horního kontaktu a zůstává jen tření v dolním kontaktu. Moment tíhy nožů roste, a svou orientací pomáhá oddalování, a zároveň tření na spodním kontaktu není konstantní, ale mění se styčnou plochou.

Při zapínání v první fázi pohybu je potřeba překonat stále se zmenšující moment tíhy a je nutno překonat tření na spodním kontaktu. V okamžiku, kdy dochází k zasouvání nože na kontaktní roubík, potřebujeme vyvinout největší moment na hřídeli - je nutno rozevřít nože pro roubík, a překonat tření

v obou kontaktech. Tíha nožů nyní působí negativně na potřebný moment na ovládací hřídeli, a je malá, jako na začátku pohybu.

#### 4.6.1 Hmotnost jednotlivých dílů[1; str.136]:

##### 4.6.1.1 Tíha dvou měděných nožů jednoho pólu odpojovače:

$$T_1 = 2 \cdot V_1 \cdot \rho_{Cu} \cdot g = 2(0,06 \cdot 0,005 \cdot 0,378) \cdot 8900 \cdot 9,81 \cong \mathbf{19,8\ N} \quad (4.6.1.1 -1)$$

Kde  $V_1$  – je objem jednoho nože se zanedbáním děr jako kompenzace tíhy spojovacího lu[m<sup>3</sup>],  $\rho_{Cu}$  – je hustota mědi [kg.m<sup>-3</sup>],  $g$  – gravitační zrychlení.

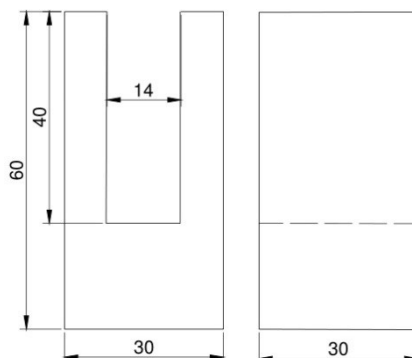
##### 4.6.1.2 Tíha dvou ocelových příložek:

$$T_2 = 2 \cdot V_2 \cdot \rho_{Fe} \cdot g = 2(0,058 \cdot 0,003 \cdot 0,151) \cdot 7800 \cdot 9,81 \cong \mathbf{4\ N} \quad (4.6.1.2 -1)$$

Kde  $\rho_{Fe}$  – je hustota oceli [kg.m<sup>-3</sup>],  $V_2$  – je objem jedné ocelové příložky se zanedbáním děr jako kompenzace tíhy spojovacího materiálu[m<sup>3</sup>]

##### 4.6.1.3 Tíha hlavice táhla

Rozměry ocelové hlavice ukazuje obr. 4.6.1.3-1, kde provedu zjednodušení výpočtu tíhy tím, že zanedbám upevňovací otvory, co bude vést k vyšší hmotnosti hlavice oproti skutečné, ale není na škodu z hlediska bezpečné funkce počítat při výpočtu momentu s vyšší tíhou.



Obr. 4.6.1.3 -1 Rozměry hlavice táhla

$$T_3 = [(0,03 \cdot 0,03 \cdot 0,06) - (0,014 \cdot 0,03 \cdot 0,04)] \cdot 7800 \cdot 9,81 = \mathbf{2,85\ N} \quad (4.6.1.3 -1)$$

##### 4.6.1.4 Tíha porcelánového táhla

Táhlo si představím jako válec o velikosti  $D = 4\ cm$ ,  $v = 10\ cm$ :

$$T_4 = V_4 \cdot \rho_{porc} \cdot g = \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} \cdot 0,10 \cdot 2900 \cdot 9,81 = \mathbf{3,58\ N} \quad (4.6.1.4 -1)$$

Kde  $\rho_{porc}$  – je hustota porcelánu [kg.m<sup>-3</sup>],  $V_2$  – je objem táhla[m<sup>3</sup>]

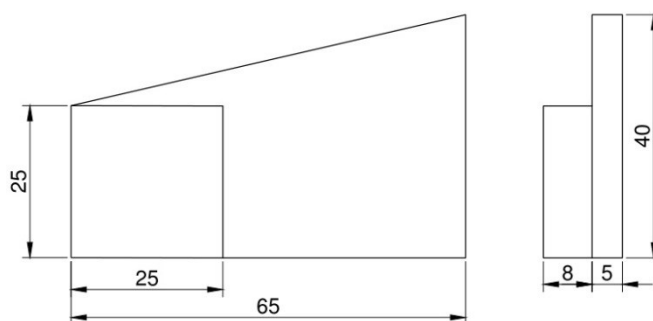
##### 4.6.1.5 Tíha šroubů táhla

Šrouby o velikosti M12 x 40. Tíhu vypočtu pro dva kusy šroubů a navýším o 15%, čím zohledním zvětšenou tíhu o matice.

$$T_5 = 2 \cdot V_5 \cdot \rho_{Fe} \cdot g = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} \cdot 0,04 \cdot 7800 \cdot 9,81 \cdot 1,15 = \mathbf{0,8\ N} \quad (4.6.1.5 -1)$$

#### 4.6.1.6 Tíha páky na hřídeli

Na obrázku je zjednodušený tvar páky (obr. 4.6.1.6 – 1)



Obr. 4.6.1.6 -1 Rozměry páky

$$T_6 = [(0,025 \cdot 0,025 \cdot 0,008) + (0,025 \cdot 0,065 \cdot 0,005) + (0,5 \cdot 0,065 \cdot 0,005 \cdot 0,015)] \cdot 7800 \cdot 9,81$$

$$= 1,2 \text{ N} \quad (4.6.1.6 -1)$$

#### 4.6.2 Statické momenty [1; str.136]:

Pro statické momenty se uvažuje nejhorší případ, který si můžu představit, jako kdyby byl odpojovač namontován na stropě. Díky rovnoměrnému rozložení jednotlivých součástí, tak tíhy působí v jejich těžišti.

##### 4.6.2.1 Moment tíhy nožů

$$M_1 = 19,8 \cdot 0,189 = 3,7 \text{ Nm} \quad (4.6.2.1 -1)$$

##### 4.6.2.2 Moment tíhy ocelových příložek

$$M_2 = 4,0 \cdot 0,755 = 0,3 \text{ Nm} \quad (4.6.2.2 -1)$$

##### 4.6.2.3 Moment celku - táhlo, šrouby, obě hlavice a páka

Porcelánové táhlo, zatmelené šrouby, obě hlavice působí na stejném ramenní o 0,139 m. Pro zjednodušení budu uvažovat působení tíhy páky na hřídeli také na tomto rameni.

$$M_3 = (3,58 + 2,2,85 + 0,8 + 1,2) \cdot 0,139 = 1,57 \text{ Nm} \quad (4.6.2.3 -1)$$

##### 4.6.2.4 Celkový moment působící na vysunutí nožů z pevného kontaktu

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3 = 3,7 + 0,3 + 1,57 = 5,57 \text{ Nm} \quad (4.6.2.4 -1)$$

Velikost síly  $F_l$ , kterou by působil moment v ose táhla ve vzdálenost  $l = 0,139 \text{ m}$  od osy otáčení je:

$$F_l = \frac{M_c}{l} = \frac{5,57}{0,139} = 40,1 \text{ N} \quad (4.6.2.4 -2)$$

#### 4.6.3 Určení momentu odporu třením a síly přemáhající tření [1; str.142]:

Díky tlačné síle, kterou vyvolají pružiny o velikosti  $F_k = 600 \text{ N}$ , existuje třecí síla, která působí mezi dotykovými místy roubíku a pohybujícího se odpojovacího nože. Na rameni tato třecí síla vyvolá třecí moment, který není po dobu pohybu nožů konstantní, ale mění se s velikostí poloměru tření. Zatímco

u horního styku s roubíkem se poloměr mění nepatrně, u dolního se tento poloměr mění více a musím s touto změnou počítat. Pro výpočet budu uvažovat s krajními velikostmi poloměrů.

Nejprve určím velikost třecí síly  $F_{tk}$  je-li součinitel tření mědi  $f = 0,35$  :

$$F_{tk} = f \cdot F_k = 0,35 \cdot 600 = \mathbf{210\ N} \quad (4.6.3 -1)$$

Uvažuju-li krajní polohy při vysouvání nožů, tak se v horním styku mění poloměr tření při natočení ramena na vysunutí z horního roubíku z 327 mm na 336 mm, a v dolním styku při natočení ramena do maximální polohy natočení ramene - vypnutí z 27 mm na 47 mm (určeno odečtem z výkresu). Protože maximální momenty se vytvářejí při malých úhlech natočení ramene, budu počítat z poloměry  $r_1 = 37\ mm, r_2 = 336\ mm$ .

Moment odporu třením  $M_t$  :

$$M_t = 2(M_{t1} + M_{t2}) = 2 \cdot F_{tk} \cdot (r_1 + r_2) = 2 \cdot 210 \cdot (0,037 + 0,336) = \mathbf{157\ Nm} \quad (4.6.3 -2)$$

Moment odporu třením vyvolá sílu v táhle  $F_t$  , která přemáhá tření:

$$F_t = \frac{M_t}{l} = \frac{157}{0,139} \cong \mathbf{1130\ N} \quad (4.6.3 -3)$$

#### 4.6.4 Ovládací moment trojpólové jednotky[1; str.142]:

Počáteční síla  $F_t$  potřebná k posunu nožů po pevném kontaktu se během pohybu nože po pevném kontaktu trochu zmenší, jak narůstá z nulové velikosti moment tíhy nože. Její velikost v okamžiku vysunutí nožů z pevného kontaktu nastává po otočení nože o úhel  $\alpha$ .

Na poloměru otáčení  $r_2 = 0,327\ m$  je dráha od místa ukončení  $l_n \approx 0,065\ m$ . Pak velikost úhlu  $\alpha_1$ , kdy dojde k vysunutí je:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{0,065}{0,327} \cong 11,2^\circ \quad (4.6.4 -1)$$

Tíha nože v ose táhla při daném pootočení je:

$$F_{11,2^\circ} = \frac{M_c}{l} \cdot \sin \alpha = \frac{5,57}{0,139} \cdot \sin 11,2^\circ \cong \mathbf{7,78\ N} \quad (4.6.4 -2)$$

**Na začátku pohybu bude vypínací moment:**

$$M_{H0} = 3 \cdot F_t \cdot r_h = 3 \cdot 1130 \cdot 0,075 \cong \mathbf{254\ Nm} \quad (4.6.4 -3)$$

**Z této počáteční velikosti bude klesat až na velikost**

$$M_{H11,2^\circ} = 3 \cdot r_h (F_t - F_{11,2^\circ}) = 3 \cdot 0,075 (1130 - 7,78) \cong \mathbf{252\ Nm} \quad (4.6.4 -4)$$

Jakmile dojde k vysunutí nožů z horního kontaktu, tak působí už jen tření v dolním kontaktu, proti kterému působí moment narůstající tíhy. Zvětším-li úhel pro otočení nože na  $\alpha_1 = 11,3^\circ$  tak tomu bude odpovídat moment:

$$M_{t2max} = 3 \cdot (2 \cdot F_{tk} \cdot r_1 - M_c \cdot \sin 11,3^\circ) = 3 \cdot (2 \cdot 210 \cdot 0,037 - 5,57 \cdot \sin 11,3^\circ) = 46,62 - 3,27 \cong \mathbf{43,4\ Nm} \quad (4.6.4 -5)$$

Moment, vyvolaný tíhou nožů na táhle se bude zvyšovat, až do své maximální hodnoty podle následujícího vztahu:

$$M_t = 3 \cdot F \cdot x = 3 \cdot F_t \cdot l \cdot \sin \alpha = 3 \cdot 1130 \cdot 0,139 \cdot \sin \alpha$$

Hodnoty momentu pro různá  $\alpha$  ukazuje následující tabulka:

**Tab. 4.6.4-1-** velikost momentu pro různý úhel otočení odpoj. nože

$\alpha [^\circ]$	11,3	20	35	45	55
$M_t [Nm]$	3,27	5,7	9,6	11,8	13,6

Podle tab. 4.6.4-1 je vidět, že ani v úhlu  $55^\circ$  maximálního otočení ramene odpojovacího nože (vypnutí), je moment odporu třením vlivem velké přítláčecí síly vyvinuté pružinami působící na dolním trvalém styku stále větší než moment tíhy nožů.

Pro obrácení děj (zapínání odpojovače) bude postup výpočtu opačný. Počáteční zapínací moment je dán největším momentem nožů a odporu třením na dolním trvalém styku:

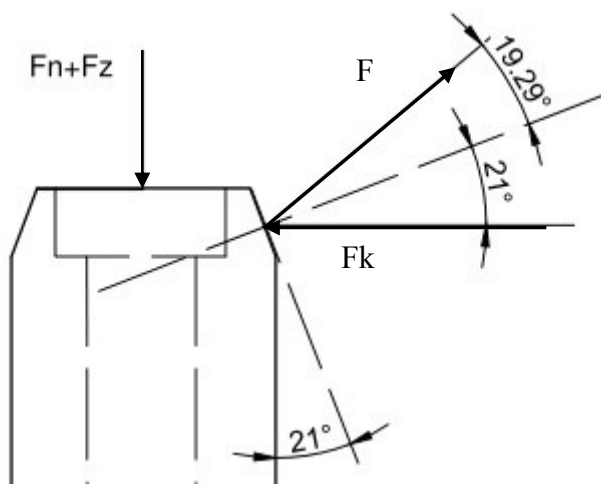
$$M_{z1} = M_{t55^\circ} + M_{tr1} = 13,6 + 46,62 \cong \mathbf{60 \text{ Nm}} \quad (4.6.4 -6)$$

Velikost tohoto momentu se pohybem odpoj. nožů během zapínání bude zmenšovat až na velikost:

$$M_{z11,3^\circ} = M_{t11,3^\circ} + M_{tr1} = 3,27 + 46,62 \cong \mathbf{50 \text{ Nm}} \quad (4.6.4 -7)$$

V místě dotyku nožů s roubíkem, kdy dochází k zasouvání, působí proti pohybu tři druhy odporů (obr. 4.6.4-1):

- Moment tíhy nožů včetně tření v dolním kontaktu  $M_{z11,3^\circ} = 50 \text{ Nm}$
- odpor kontaktního tlaku  $F_k = 600 \text{ N}$  působící pod úhlem zkosení  $21^\circ$  náběhové plošky
- odpor tření mědi po mědi ( $f = 0,35$ ;  $\varphi = \arctg f = \arctg 0,35 = 19,29^\circ$ )



**Obr. 4.6.4 -1** Působící síly při na začátku zasouvání roubíku

Sloučím kontaktní tlak a vliv tření, a velikost zasouvací síly je potom:

$$F_{z1} = F_k \cdot \tan(21^\circ + 19,29^\circ) = 600 \cdot \tan(40,29) \cong \mathbf{509 \text{ N}} \quad (4.6.4 -8)$$



Tato síla působí na rameni  $r_2 = 0,336 \text{ m}$  a moment na hřídeli bude:

$$M_{Hřid} = 3.2. F_{z1} \cdot \frac{r_2}{l} \cdot r_h + M_{H11,3^\circ} = 3.2.509 \cdot \frac{0,336}{0,139} \cdot 0,075 + 50 =$$

$$\cong \mathbf{604 \text{ Nm}} \quad (4.6.4 -9)$$

Při použití pohonu, který vyvine tento moment, tak by odpojovač měl spolehlivě, i přes značné zjednodušení ovládacího mechanismu, přecházet z jednoho stavu do druhého.

## ZÁVĚR

Odpojovač je navržen ze zadaných hodnot uváděných v tabulce 4.1. Provedení odpojovače odpovídá normě [2], a postup výpočtů strukturou odpovídá návodu podle [1].

Při návrhu odpojovače jsem si uvědomil, že je třeba si vždy každou navrhovanou součást pečlivě rozmyslet, protože vše zde souvisí se vším a v závěru se pak projeví u ověřování na buď ustálené oteplení, nebo na krátkodobé oteplení, nebo dokonce při výpočtu momentu na hřídeli.

Při návrhu izolačních vzdáleností si jako návrháři nemůžeme moc vybírat. Po výběru izolačního media se vychází z empirických vztahů pro jednotlivé konfigurace elektrod a pro velikosti přeskokových napětí. Tyto vypočtené minimální vzdálenosti je pak z hlediska bezpečnosti nutno dodržet. Já jsem izolační vzdálenosti mírně navýšil s ohledem na doporučené vzdálenosti [2]. Odpojovač můžu tedy považovat z hlediska izolačních vzdáleností za mírně předimenzovaný. To samozřejmě není na škodu, pokud ovšem nejste svázáni pevnými rozměry odpojovače (velikost skříně, přání zákazníka atd.). Pro zajištění izolační vzdálenosti proti zemi jsem si vybral izolační podpěrku, jejíž parametry jsou znázorněny v kapitole 3.3.

Nejdůležitější částí návrhu odpojovače, je návrh proudovodné dráhy. Ta nám pak charakterizuje vlastnosti odpojovače (oteplení, hmotnost, velikost zkratového proudu a další). Proudovodná dráha odpojovače je vyrobena z mědi (elektrovodná měď o čistotě 99,9%), a roubík charakterizující pevný kontakt má navíc povrchovou úpravu postříbřením (vrstva v řádu jednotek  $\mu m$ ). Toto postříbření je provedeno hlavně kvůli mechanickým vlastnostem (nízká tvrdost stříbra proti cizím vrstvám tvořících se na mědi). Pro návrh průřezů jsem použil metodu proudové hustoty, a její hodnota by měla být z intervalu 1,5–4 A/mm<sup>2</sup>. Volil jsem nižší hodnoty z tohoto intervalu, a to z důvodu, že v případě rezervy dovoleného oteplení, se průřez může snížit případným odvrtáním děr. Určený průřez odpovídá předepsaným velikostem podle [2]. Průřez připojovacího nože jsem zvolil 60x10 mm, rozměry odpojovacího nože (výhodné rozdělení na dva paralelní vodiče, z hlediska rozdělení procházejícího proudu) je 60x5 mm pro jeden nůž. Abych dodržel nízkou proudovou hustotu, zvolil jsem průměr roubíku na 31 mm. Této vzdálenosti pak odpovídá vzdálenost mezi odpojovacími noži, které jsou pomocí ocelových rozpěrek připevněny k sobě. Rozpěrky mají navíc tu vlastnost, že díky elektrodynamickým silám při průchodu zkratového proudu zabráňují prohnutí odpojovacích nožů. Vliv elektrodynamických účinků zkratového proudu mezi noži odpojovače a zvolená vzdálenost mezi rozpěrkami, se ukázala v případě navrhovaného odpojovače jako klíčová pro navržení přitlačné pružiny na kontakt a samozřejmě s tím souvisí i velikost celkového momentu na hřídeli.

V diplomové práci jsem dále navrhnul pomocnou přitlačnou pružinu. Než jsem zjistil její potřebnou velikost, bylo třeba z přechodových odporů zjistit minimální přitlačné síly na kontakt, a to jak z průchodu jmenovitým proudem, tak z průchodu zkratovým proudem. Pro určení této síly jsem vycházel z tabulkových hodnot úbytků napětí na mezi svaření kontaktů. Dále jsem vypočítal elektrodynamické síly, které vlivem průchodu proudu působí na kontakt. Z výsledné elektrodynamické síly jsem pak určil velikost pomocné přitlačné síly na kontakt. Zde jsem narazil na problém týkající se svaření kontaktů. Přestože výsledná elektrodynamická síla je kladná, a se zvyšováním proudem tedy roste přitlačná síla na kontakt důsledkem elektrodynamické síly, tak by v principu nemělo dojít ke svaření kontaktů. S tímto jsem navrhl přitlačnou pružinu o velikosti 300 N, a ta převyšovala minimální přitlačnou sílu s ohledem na přechodový odpor o 130%. Při ověřování krátkodobým oteplením jsem zjistil, že u takto navrženého odpojovače by došlo ke svaření kontaktů. Aby nedošlo ke svaření kontaktů, byl jsem nucen něco změnit. Z hlediska charakteru vstupních hodnot pro návrh odpojovače je při nejvyšším dovoleném napětí sítě 7,2 kV relativně velký jmenovitý proud 1250 A, a k tomuto proudu zase relativně malý zkratový proud 25000 A. Dodržením doporučených rozměrů [2] a velikost průřezu tak, abych udržel proudovou hustotu při zadaném jme-

novitým proudem v dolní hranici intervalu ( $1,5-4 \text{ a/mm}^2$ ) vede spíše k tuhé konstrukci proudovodné dráhy. Na druhou stranu zkratový proud (zadaný) nevyvolá tak velkou elektrodynamickou sílu, u provedení konstrukce mého odpojovače, aby výsledná síla působila větší přitlačnou silou na kontakt. A zde je můj problém svařování kontaktů.

V součtu sil, které vyvolá průchod zkratového proudu, je pozitivní silou, při navrhování odpojovače, síla působící mezi rovnoběžnými noži. Ta také působí ve směru přitlačné síly na kontakt a v podstatě pomáhá snižovat přechodový odpor a zvyšuje tak kvalitu styku. Abych zvýšil tedy tuto sílu, měl jsem v podstatě několik možností. První možností je snížit průřez součástí a snížit tak tuhost konstrukce. To ale na druhou stranu zvyšuje proudové zatížení a tudíž větší oteplení proudových částí. Nutnost tedy znovu překontrolovat dovolené oteplení. Další možností je, zmenšit vzdálenost mezi rovnoběžnými noži. Změna by jistě zvýšila sílu působící mezi noži, ale na druhou stranu snížila průřez pevného kontaktu ve tvaru roubíku. Opět by to znamenalo vyšší proudové zatížení s riskováním překročení dovoleného oteplení. Další možností jak zvýšit přitlačnou sílu na kontakt mezi noži je zvětšením vzdáleností mezi ocelovými rozpěrkami. To by snížilo tuhost konstrukce, a tím by se zvýšila přitlačná síla. Zde je pak nutnost překontrolovat na vlastní rezonanci paralelních vodičů. Poslední možností a mou zvolenou je navrhnout větší pomocnou přitlačnou pružinu. Zvýšením přitlaku na 600 N jsem tak docílil toho, že při velikosti zadaného zkratového proudu se mi kontakty nesvaří. Negativním vlivem většího pomocného přitlaku je nutnost většího potřebného momentu na hřídeli, aby docházelo ke spolehlivému přechodu z jednoho stavu do druhého při překonávání většího třecího momentu mezi kontakty.

Součástí diplomové práce bylo doporučit velikost momentu na hřídeli, aby docházelo ke spolehlivému přechodu z jednoho stavu do druhého. Při návrhu jsem vycházel z upevnění odpojovače na svislé stěně. Přestože nebylo v požadavku diplomové práce navrhnout mechanický systém přechodu, pro určení jednotlivých hmotností jednotlivých součástí a určení následného momentu je třeba tyto hmotnosti znát. Proto jsem velice zjednodušeně provedl jednoduchý mechanický systém a vypočtený výsledný moment na hřídeli pro pohon je s ohledem na zjednodušení, dle mého názoru dostatečný.

Nezbytnou součástí návrhu odpojovače je kontrola na ustálené oteplení proudovodné dráhy. Při návrhu jsem vycházel ze struktury návrhu podle [1] a [4]. Oteplení proudovodné dráhy jsem řešil metodou jednořadové tepelné sítě. Musím uznat, že tento postup výpočtu je velmi zdoluhavý, a pracný. Je možnost určitého zjednodušení v případě zanedbání určitých chladicích ploch, ale to záleží především na zkušenostech návrháře. Výsledná tepelná síť je znázorněna v příloze P1. Z hlediska oteplení proudovodné dráhy, při předpokládaném oteplení 45 K, které bylo použito pro výpočet tepelného pole, návrh odpojovače v celku uspěl. V kontaktech nepřekročím předpokládané oteplení o 5%. Na nožích odpojovače sice toto předpokládané oteplení překročím o 13 %, tedy 51 K, ale v případě holých vodičů je toto překročení z hlediska dovoleného oteplení bezvýznamné.

Závěrem už jen napíšu charakteristické hodnoty navrženého odpojovače:

- Jmenovité napětí .....7,2 kV
- Jmenovitý proud.....1250 A
- Jmenovitý krátkodobý proud.....10 kA
- Jmenovitý dynamický proud .....25 kA
- Doba zkratu.....2 s
- Doporučený moment pro motor....604 Nm

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D.(1985). *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů*. Brno: Ediční středisko Brno.
- [2] ČSN EN 62271-102 *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu na napětí nad 1000V*. (2003).
- [3] Helštýn, D., Kačor, P., Hytka, Z.(2003). *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. Ostrava: Skripta VŠB-TU.
- [4] Šimek, D.,(2013). *Výpočet a měření oteplení odpojovače*. Brno: Bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] Hrubý, R.,(2010). *Návrh odpojovače na vysoké napětí*. Brno: Bakalářské práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] Katalogy odpojovačů firmy IVEP.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>obr. 1.3-1</b> provedení vnitřního odpojovače	10
<b>obr. 3.1.3-1</b> závislosti izolačních médií	13
<b>obr. 4.2.6.3-1</b> zjednodušené uspořádání působících sil praporec-rovno. nože	26
<b>obr. 4.2.6.6-1</b> vzdálenosti a působící síla záhybu	28
<b>obr. 4.3.2.1-1</b> Připojovací pás odpojovače	29
<b>obr. 4.3.2.8-1</b> náhradní $\pi$ -článek horního pasu	31
<b>obr. 4.3.2.9-1</b> rozměry kloubu uchycení nožů	32
<b>obr. 4.3.2.10-1</b> kompletní tepelné schéma horního praporce	34
<b>obr. 4.3.3.2-1</b> náhradní $\pi$ -článek dolního praporce	35
<b>obr. 4.3.4 -1</b> rozměry roubíku	35
<b>obr. 4.3.4.7-1</b> – náhradní schéma horního a dolního roubíku	37
<b>obr. 4.3.5.1-1</b> rozměry odpojovacího nože	37
<b>obr. 4.3.5.7-1</b> náhradní $\pi$ -článek odpojovacího nože	40
<b>obr. 4.3.5.9-1</b> Odpojovací nůž s konci nože jako s chladicími tyčemi	42
<b>obr. 4.3.5.10-1</b> délka siločáry	42
<b>obr. 4.3.5.11-1</b> dva paralelní odpory pro dva uzly	44
<b>obr. 4.3.5.12-1</b> odpojovací nůž s ocelovými příložkami	45
<b>obr. 4.3.5.12-2</b> jednořadové schéma odpojovacího nože s ocelovými příložkami	45
<b>obr. 4.3.6.5-1</b> náhradní schéma činného styku	46
<b>obr. 3.3.7-1</b> Šroub M16	46
<b>obr. 4.3.7.5-1</b> náhradní schéma šroubového spoje	47
<b>obr. 4.3.8.5-1</b> náhradní schéma šroubového spoje roubík-praporec	48
<b>obr. 4.3.8.2-1</b> náhradní schéma horní přípojnice	49
<b>obr. 4.3.9.2-1</b> náhradní schéma dolní přípojnice	50
<b>obr. 4.4.2-1</b> zkratová charakteristika odpojovače	51
<b>obr. 4.6.1.3 -1</b> Rozměry hlavice táhla	55
<b>obr. 4.6.1.6 -1</b> Rozměry páky	55
<b>obr. 4.6.4 -1</b> Působící síly při na začátku zasouvání roubíku	58
<b>P1</b> -Tepelná síť odpojovače	63
<b>P2</b> -Rozměry odpojovače	64
<b>P3-1</b> Charakteristika použitého izolátoru	65
<b>P3-2</b> Rozměry použitého izolátoru	66

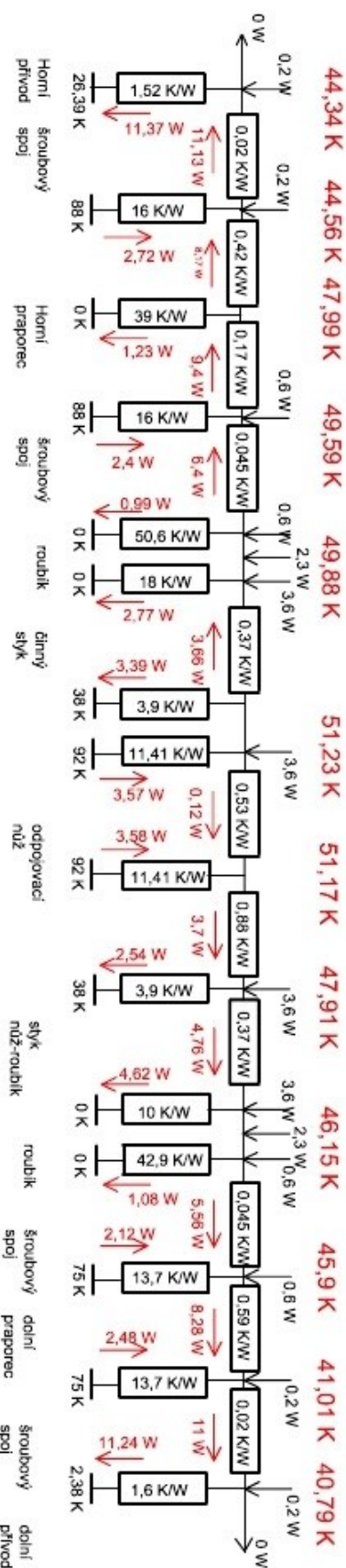
## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 3.1.1</b> Velikosti zkušebních napětí podle ČSN EN 62271-102	12
<b>Tab. 4-1</b> Zadané hodnoty	17
<b>Tab. 4.1.5-1</b> Nastavení koordinačního hrotu	21
<b>Tab. 4.3.2-1</b> Činitele zvýšení elektrického odporu horního pasu	29
<b>Tab. 4.4.3 – 1</b> Úbytky napětí při daném proudu	52
<b>Tab. 4.5-1</b> - Varianty výpočtů průřezu pružiny	53
<b>Tab. 4.6.4-1</b> - Velikost momentu pro různý úhel otočení odpoj. nože	57

## SEZNAM PŘÍLOH

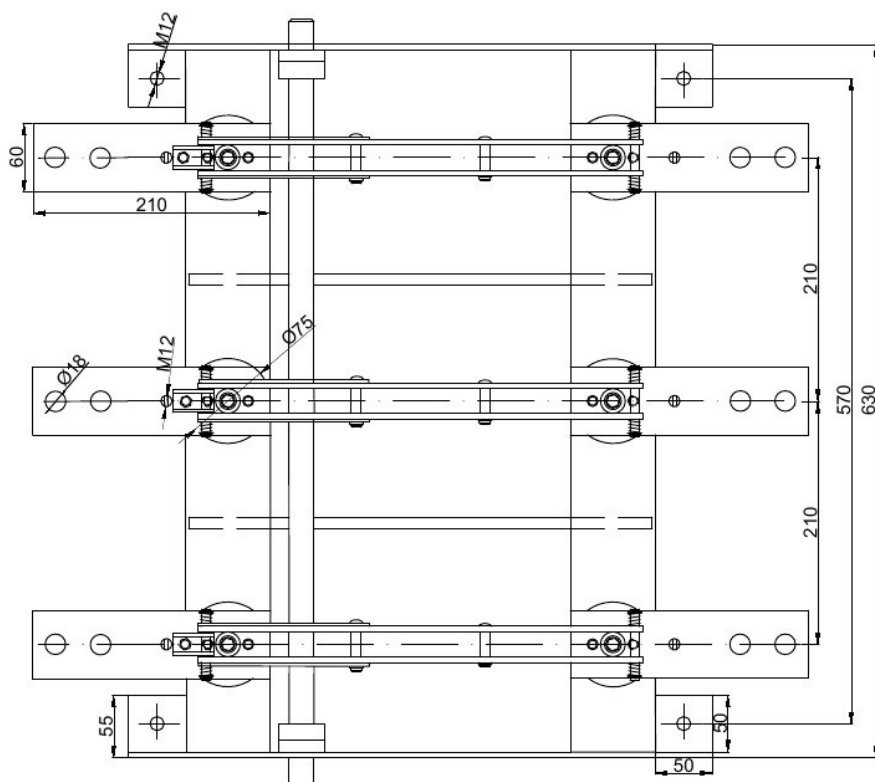
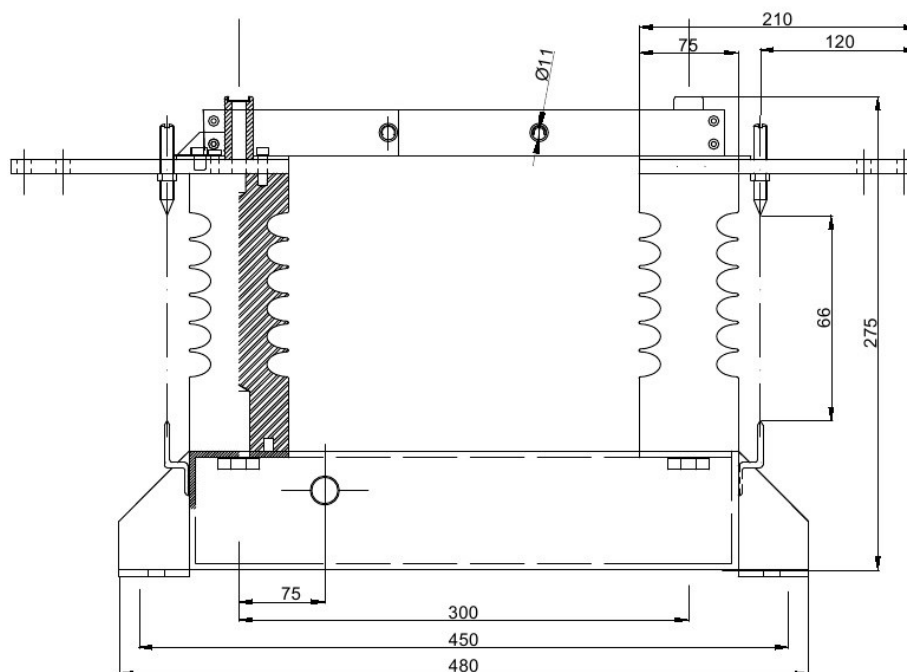
<b>Příloha P1-</b> Kompletní tepelná síť	63
<b>Příloha P2</b> – Rozměry odpojovače	64
<b>Příloha P3</b> – Izolační podpěrka	65

## Příloha P1 – Tepelná síť odpojovače





## Příloha P2 – Rozměry odpojovače



### P3-Izolační podpěrka

Proudovodnou dráhu odpojovače ponosou v izolačních vzdálenostech izolátory, jejichž výrobcem je firma **Veneta izolátory**. Jedná se o izolátory s epoxidové pryskyřice s vnitřní kovovou kostrou, zaručující mechanickou a elektrickou pevnost. Daný izolátor odpovídá normám IEC 60273, IEC 60660, IEC 60137. Některé jeho charakteristické hodnoty spolu s izolátorem ukazují následující obrázky



#### General characteristics

Epoxy resin post insulators, for indoor application, with internal metal fitting. These insulators are particularly suitable to be used as single supports for conductors, for fuses and for other equipment (as switchgears).

#### Application

For indoor installation with working condition at T° max. 100 °C.

#### Working voltage

From 12 up to 36 kV  
(40,5 kV available on request)

#### Reference standards

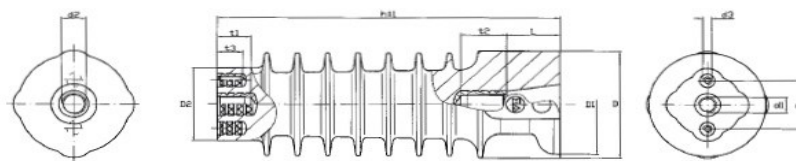
IEC 60273 (CEI 36/12) - CENELEC HD 578 S1  
IEC 60660 (Fascicolo S/663)  
IEC 60137

#### Commercial code

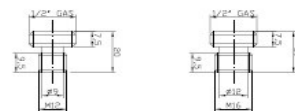
1G101 + drawing (example IPA 7,2/4000 commercial code = 1G10107204)

Identification			Electrical data			Mechanical data		Technical data		
Reference to IEC designation	Type	Drawing	Maximum operation voltage	Lightning impulse voltage withstand	Dry power frequency voltage withstand	Ultimate bending stress	Maximum deflection difference between 20% and 50% of the specified load	Creepage distance	Fins	Weight
			kV	kV	kV	N	mm	mm	N°	kg.
JO 4 - 60	IPA 7,2/4000	07204	7,2	60	28	4000	1,5	>150	3	0,6
JO 8 - 60	IPA 7,2/8000	07208				8000				
JO 4 - 75	IPA 12/4000	10010				4000		>235		0,7

Obr. P3-1 Charakteristika použitého izolátoru



Accessories  
Nickel-plated male reduction.



Drawing 3012

Drawing 3016

Technical data											
h	D	d1	t1	d2	t2	L	d3	t3	d	D1	D2
Insulator height	Maximum nominal diameter of insulating part	Upper threaded centre hole (tapped)	Hole depth d1	Base threaded centre hole (tapped)	Hole depth d2	Distance between base face and lower threaded end	Auxiliary upper threaded hole (tapped)	Hole depth d3	Distance between threaded holes d3	Maximum diameter base face	Maximum diameter upper face
mm. (+1)	mm.		mm. (min.)		mm. (min.)	mm.		mm. (min.)	mm.	mm.	mm.
95	82	M12	18	M12 M16	25	0 18	— M8	— 15	— 46	70	55 70

Obr. P3- 2 Rozměry použitého izolátoru